

ФИЦ
КНЦ
РАН

- НАУКИ О ЗЕМЛЕ
- ЖИЗНЬ НАУКИ.
КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ
- КНИГОИЗДАНИЕ
- ЮБИЛЯРЫ

ВЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

2/2019



2/2019 (11)

Издается с декабря 2009 года
DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2
ISSN 2307-5228

0+

ВЕЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

Научно-информационный журнал

Основан в 2009 году
Выходит 4 раза в год

Учредитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук»

Свидетельство о регистрации СМИ

ПИ № ФС77-74987 от 22.02.2019
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Главный редактор, председатель Редакционного совета
С. В. КРИВОВИЧЕВ, чл.-корр. РАН, д. г.-м. н., проф.

Заместитель главного редактора

В. К. Жиров, чл. - корр.
Ответственный секретарь
А. С. Карпов, к. т. н.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В. А. МАСЛОБОВЕВ, д. т. н., руководитель редколлегии;
Н. К. БЕЛИШЕВА, д. б. н.;
Е. А. БОРОВИЧЕВ; к. б. н.;
О. Б. ГОНТАРЬ, к. б. н. (ПАБСИ КНЦ РАН);
П. Б. ГРОМОВ, к. т. н.;
В. Е. ИВАНОВ, д. ф.-м. н.;
А. А. КОЗЫРЕВ, д. т. н., проф., заслуженный деятель науки РФ;
В. В. МЕГОРСКИЙ, к. м. н.;
Д. В. МОИСЕЕВ, к. г. н. (ММБИ КНЦ РАН);
А. Г. ОЛЕЙНИК, д. т. н.;
Т. В. РУНДКВИСТ, к. г.-м. н.;
С. В. ФЕДОСЕЕВ, д. э. н.

Печатается по решению Ученого совета ФИЦ КНЦ РАН.

Публикация статей не является свидетельством того, что издатель разделяет мнения их авторов; ответственность за суждения и оценки, выраженные в публикуемых статьях, лежит исключительно на авторах.

184209, г. Апатиты, Мурманская обл.,
ул. Ферсмана, 14
Тел.: 8-81555-79-754
E-mail: a.mendeleva@ksc.ru

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Б. В. ЕФИМОВ, д. т. н., проф., заслуженный энергетик РФ;
В. К. ЖИРОВ, чл.-корр. РАН, д. б. н., проф.;
Б. В. КОЗЕЛОВ, д. ф.-м. н. (ПГИ);
Н. Е. КОЗЛОВ, д. г.-м. н., проф.;
С. А. КУЗНЕЦОВ, д. х. н. заслуженный металлург РФ;
Ф. Д. ЛАРИЧКИН, д. э. н., проф., заслуженный экономист РФ;
С. В. ЛУКИЧЕВ, д. т. н.;
Д. В. МАКАРОВ, д. т. н.;
Г. Г. МАТИШОВ, академик РАН, д. г. н., проф. (ММБИ КНЦ РАН);
А. И. НИКОЛАЕВ, чл.-корр. РАН, д. х. н., проф.,
заслуженный деятель науки РФ;
В. А. ПУТИЛОВ, д. т. н., проф.; заслуженный деятель науки РФ;
И. А. РАЗУМОВА, д. и. н., проф.

Научное издание

Ответственный редактор А. С. Менделева
Редакторы: С. А. Шарам, Е. Н. Еремеева (англ. яз.)
Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 27.06.2019.
Дата выхода в свет 02.10.2019. Формат бумаги 60×84 1/8
Усл. печ. л. 15. Заказ № 25 Тираж 300 экз.
Свободная цена.

Адрес учредителя, издателя и типографии: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН»
184209, г. Апатиты, Мурманская обл., ул. Ферсмана, 14

Журнал включен в систему Российского индекса
научного цитирования.

Подписной индекс в каталоге «Почта России» — П3898

С требованиями к авторам статей, редакционной политикой журнала, а также с архивом выпущенных номеров можно ознакомиться на сайте журнала по адресу:
<http://www.naukaprint.ru/zhurnaly/vestnik/>.

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр Российской академии наук», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Лукичев С. В., Козырев А. А., Семенова И. Э., Белогородцев О. В., Аветисян И. М., Хомкин Е. Е.</i> Научное обоснование перспективной отработки апатит-нефелиновых руд на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях.....	5
<i>Козырев А. А., Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Пантелеев А. В.</i> Применение методики выявления сейсмически опасных участков массива для анализа события 9 января 2018 года на Расвумчоррском руднике.....	13
<i>Лукичев С. В., Семенова И. Э., Земцовский А. В., Громов Е. В.</i> Определение границ охранных целиков в тектонически напряженных массивах.....	19
<i>Козырев С. А., Калюжный А. С.</i> Районирование прибортового массива пород карьера «Железный» по устойчивости элементов открытой геотехнологии с учетом коэффициента сейсмичности.....	28
<i>Козырев С. А., Камянский В. Н.</i> Разработка численных моделей взрыва скважинных зарядов в массиве горных пород.....	34
<i>Калашник А. И., Запорожец Д. В., Калашник Н. А.</i> Многоуровневая система мониторинга гидротехнических сооружений горнопромышленных предприятий и гидроэнергетики Мурманской области.....	45
<i>Козырев С. А., Власова Е. А.</i> Исследование химического взаимодействия аммиачной селитры с сульфидсодержащими минералами в составе гематит-магнетитовых кварцитов Оленегорского месторождения.....	54
<i>Матыцын А. В., Ловчиков А. В., Любин А. Н., Королев А. А.</i> Повышение безопасности камерно-столбовой системы разработки на руднике Карнасурт и перспективы его развития.....	61
<i>Калашник Н. А.</i> Оценка надежности насыпного грунтового сооружения при образовании в его теле зоны повышенной фильтрации.....	69
<i>Бусырев В. М.</i> Экономические основы рационального освоения минерально-сырьевых ресурсов недр.....	75
<i>Марчевская В. В., Мухина Т. Н.</i> Разработка ресурсосберегающей гравитационно-флотационной технологии обогащения тонкодисперсных малосульфидных руд Кольского полуострова.....	83
<i>Митрофанова Г. В., Черноусенко Е. В., Каменева Ю. С., Вишнякова И. Н.</i> Опробование комплексобразующего реагента на основе гидроксамовых кислот при флотации минералов переходных металлов	95
<i>Наумов В. А., Гусак С. А.</i> Изучение закономерностей образования источников тепла в хранилищах контейнерного типа для отработавшего ядерного топлива реакторов малой мощности.....	105
ЖИЗНЬ НАУКИ. КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ.....	116
КНИГОИЗДАНИЕ.....	123
ЮБИЛЯРЫ.....	126
AD MEMORIAM.....	129

2/2019 (11)

Published since December 2009
DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2
ISSN 2307-5228

HERALD

of the Kola Science Centre of RAS

Publisher – Federal State Budgetary Science Institution Federal Research Centre “Kola Science Centre of RAS”

Mass Media Registration Certificate

ПИ № ФС77-74987 issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media on February, 22 2019.

Editor-in-Chief and Chairman of the Editorial Council

S. V. KRIVOVICHEV, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof.

Vice Editor-in-Chief

V. K. Zhiron, Cor. Member of RAS

Responsible Secretary

A. S. Karpov, PhD

EDITORIAL BOARD

V. A. MASLOBOEV, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Editorial Board;
N. K. BELISHEVA, Dr. Sci. (Bio);
E. A. BOROVIKHEV, PhD (Bio);
O. B. GONTAR', PhD (Bio), PABGI KSC RAS;
P. B. GROMOV, PhD (Eng.);
V. E. IVANOV, Dr. Sci. (Phys. & Math.);
A. A. KOZYREV, Dr. Sci. (Eng.), Honoured Scientist of the RF, Prof.;
V. V. MEGORSKY, PhD (Medicine);
D. V. MOISEEV, PhD (Geography), MMBI KSC RAS;
A. G. OLEJNIK, Dr. Sci. (Eng.);
T. V. RUNDKVIST, PhD (Geol. & Mineral.);
S. V. FEDOSEEV, Dr. Sci. (Econ.)

Published by decision of Academic Council of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of RAS”.

EDITORIAL COUNCIL

B. V. EFIMOV, Dr. Sci. (Eng.), Honoured Power Engineer of the RF, Prof.;
V. K. ZHIROV, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Bio), Prof.;
B. V. KOZELOV, Dr. Sci. (Phys. & Math.), PGI;
N. E. KOZLOV, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof.;
S. A. KUZNETZOV, Dr. Sci. (Chem.), Honoured Metallurgist of the RF;
F. D. LARICHKIN, Dr. Sci. (Econ.), Honoured Economist of the RF, Prof.;
S. V. LUKICHEV, Dr. Sci. (Eng.);
D. V. MAKAROV, Dr. Sci. (Eng.);
G. G. MATISHOV, Academician of RAS, Dr. Sci. (Geography), Prof., MMBI KSC RAS;
A. I. NIKOLAEV, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Chem.), Honoured Scientist of the RF, Prof.;
V. A. PUTILOV, Dr. Sci. (Eng.), Honoured Scientist of the RF, Prof.;
I. A. RAZUMOVA, Dr. Sci. (History), Prof.

Scientific Publication

Executive Editor A. S. Mendeleva
Editors: S. A. Sharam, Ye. N. Yeremeyeva (English)
Technical Editor V. Yu. Zhiganov

The journal has been included in the Russian Science Citation Index (RISC) since 2009.

Subscription index: П3898 (Russian Post catalog).

Statements and opinions expressed in the articles are those of the author(s) and not necessarily those of the Publisher. The Publisher disclaims any responsibility or liability for the published materials.

184209, Fersman str., 14, Apatity, Murmansk Oblast
Tel. 8-81555-79-754
E-mail. a.mendeleva@ksc.ru

Information for authors, our policy and archive:
<http://www.naukaprint.ru/zhurnaly/vestnik/>.

© Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Centre “Kola Science Centre of RAS”, 2019

CONTENTS

EARTH SCIENCES

<i>Sergey V. Lukichev, Anatoly A. Kozyrev, Inna E. Semenova, Oleg V. Belogorodtsev, Ivan M. Avetisian, Igor E. Khomkin</i> Scientific Substantiation of the Prospective Apatite-Nepheline Ore Mining at the Great Depths under Complicated Mining and Geological Conditions.....	5
<i>Anatoliy A. Kozyrev, Inna E. Semenova, Olga G. Zhuravleva, Aleksey V. Panteleev</i> An Approach to Identify Seismic Hazardous Areas for Analyzing a Geodynamic Event at the Rasvumchorr Mine on January 9, 2018.....	13
<i>Sergey V. Lukichev, Inna E. Semenova, Alexander V. Zemtsovskii, Yevgeny V. Gromov</i> The definition of the Protective Pillar Boundaries in Tectonically Stressed Rock Masses.....	19
<i>Sergej A. Kozyrev, Anton S. Kaluzhny</i> Zoning the Adjacent Rock Mass of the Zhelezny Open Pit in Terms of the Open Geotechnology Elements Stability, Taking into Account the Seismicity Coefficient.....	28
<i>Sergej A. Kozyrev, Victor N. Kamyanskiy</i> Development of Numerical Models of Borehole Charges Blasting in Rock Massif.....	34
<i>Anatoly I. Kalashnik, Dmitry V. Zaporozhets, Nadezhda A. Kalashnik</i> Multilevel Monitoring System of Hydraulic Facilities: the Case Study of Enterprises of the Murmansk Region.....	45
<i>Sergej A. Kozyrev, Elena A. Vlasova</i> Investigation of the Chemical Interaction of Ammonium Nitrate with Sulfide-Containing Minerals in the Composition of Hematite-Magnetite Quartzite of the Olenegorsk Deposit.....	54
<i>Andrew V. Matytsyn, Aleksandr V. Lovchikov, Aleksandr N. Lyubin, Anatoliy A. Korolev</i> Safety Improvement of the Room-and-Pillar Mining Method at Karnasurt Mine and its Development Prospects.....	61
<i>Nadezhda A. Kalashnik</i> Assessment of Reliability of a Bulk Soil Dam during Formation of an Increased Filtration Zone in Its Body.....	69
<i>Vladislav M. Busyrev</i> Economic Bases of Efficient Use of Subsoil Mineral Resources.....	75
<i>Valentina V. Marchevskaya, Tatyana N. Mukhina</i> Development of a Resource-Saving Gravity-Flotation Beneficiation Technology for Fine-Dispersed Low-Sulphide Ores of the Kola Peninsula.....	83
<i>Galina V. Mitrofanova, Elena V. Chernousenko, Yuliya S. Kameneva, Irina N. Vishnyakova</i> Testing of a Complexing Reagent on the Basis of Hydroxamic Acids by Floating Transition Metal Minerals.....	95
<i>Vadim A. Naumov, Sergey A. Gusak</i> Study of Formation Regularities of Heat Sources in the Cask Type Storage Facilities for Spent Nuclear Fuel of the Low-Power Reactors.....	105
CONFERENCES.....	116
NEW BOOKS.....	123
ANNIVERSARIES.....	126
AD MEMORIAM.....	129

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.5-12

УДК 622.272.6/622.831

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ОТРАБОТКИ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

С. В. Лукичев, А. А. Козырев, И. Э. Семенова,
О. В. Белогородцев, И. М. Аветисян, Е. Е. Хомкин
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

На основе комплекса геологических, геомеханических и технологических моделей исследовано влияние масштабов открыто-подземной геотехнологии на геомеханическое состояние крупной горнотехнической системы. Выявлены закономерности перераспределения напряжений в окрестности очистных пространств на больших глубинах в условиях высокого тектонического сжатия, гористого рельефа и взаимного влияния открытых и подземных горных работ, позволившие сформулировать принципы безопасной отработки месторождений в сложных геомеханических условиях. На примере отработки перспективных подземных запасов Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений Кировского рудника АО «Апатит» выполнена оценка влияния геологических, горнотехнических и геомеханических факторов на безопасность и производительность рудника при различных сценариях развития горных работ. Представлены научно обоснованные технические решения, позволяющие вести отработку запасов в условиях углубления горных работ на удароопасных апатит-нефелиновых месторождениях.

Ключевые слова:

удароопасные месторождения, подземный рудник, карьер, система разработки, геодинамические риски, блок-целик, цифровое 3D-моделирование, напряженно-деформированное состояние.

SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF THE PROSPECTIVE APATITE-NEPHELINE ORE MINING AT THE GREAT DEPTHS UNDER COMPLICATED MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

Sergey V. Lukichev, Anatoly A. Kozyrev, Inna E. Semenova,
Oleg V. Belogorodtsev, Ivan M. Avetisian, Igor E. Khomkin
Mining Institute of KSC RAS, Apatity

Abstract

Based on the complex of geological, geomechanical and technological models, the influence of the scale of an open-underground geotechnology on the geomechanical state of a large mining-engineering system, has been investigated. The regularities of the stress redistribution in vicinity of stopes at great depths under conditions of high tectonic compression, mountainous relief and the mutual influence of open and underground mining operations have been identified that made it possible to formulate the principles of safe mining in complicated geomechanical conditions. Using the example of underground mining of the Kukisvumchorr and Yukspor prospective reserves, owned the Kirovsky mine (Apatit, JSC) the influence of geological, mining-engineering and geomechanical factors on the safety and productivity of the mine was evaluated under various mining development scenarios. The scientifically based technical solutions, that allow to develop the reserves under the conditions of deepening mining at the rockburst hazardous apatite-nepheline deposits, are presented.

Keywords:

rockburst-hazardous deposits, underground mine, open pit, mining method, geodynamic risks, block-pillar, digital 3D modeling, stress-strain state.

Введение

Перспективным планом развития рудной базы Кировского филиала (КФ) АО «Апатит» предусматривается увеличение объемов добычи апатит-нефелиновых руд подземным способом, которое стало возможным при внедрении на предприятии современных технологий и высокопроизводительного горного оборудования. Интенсификация горных работ позволяет снизить издержки производства. Однако для обеспечения стабильной и безопасной работы горного предприятия необходима предварительная оценка условий, в которых будет производиться отработка запасов месторождений, что позволит разработать эффективную технологию ведения горных работ.

Из всех рудников КФ АО «Апатит» Кировский рудник является самым старым подразделением, основан 7 октября 1939 г., в этом году ему исполнится 90 лет. В настоящее время он основной поставщик апатит-нефелиновой руды, здесь добыто более 800 млн т руды.

Объект, цель и задачи исследований

В настоящее время при отработке запасов месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива рудниками КФ АО «Апатит» происходит изменение соотношения объемов открытой и подземной добычи (с увеличением последней). Это связано с тем, что для поддержания сырьевой базы необходимо вовлечение в отработку запасов на глубине до 1000 м от дневной поверхности. Очистные работы на руднике ведутся на горизонтах +250, +170, +90 м Кукисвумчоррского месторождения и +320, +250, +170 м Юкспорского месторождения с применением системы разработки подэтажного обрушения, скважинной отбойкой руды, ее торцевым выпуском и доставкой самоходным горнотранспортным оборудованием [1]. Запланированная предприятием интенсификация подземных горных работ и увеличение производственной мощности по добыче руды до 25 млн т в год диктуют необходимость вовлечения в отработку запасов руды, которые находятся на участках с более сложными условиями разработки. В существенной мере это связано с действием на массив горных пород высоких тектонических напряжений и ростом их абсолютных величин с глубиной, что предопределяет повышение риска горных ударов. Данные факторы требуют комплексного подхода при решении задач по обеспечению безопасности и эффективности горных работ [2].

Реализация планов развития горных работ Кировского рудника при вовлечении в отработку балансовых запасов объединенного гор. +10 м Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений, в том числе запасов блоков-целиков гор. +170 м в районе Саамского карьера, стала возможна после анализа условий отработки запасов глубоких горизонтов [3].

Первоочередные задачи:

- создание цифровой модели фактического и планируемых вариантов состояния очистной выемки будущих периодов в пределах каждого подземного горизонта (рис. 1);
- оценка влияния разных факторов на технологию отработки запасов руды в условиях глубоких горизонтов Кировского рудника.

Основные сдерживающие производственную мощность подземного рудника факторы:

- формирование блока-целика (БЦ) гор. +170 м при приближении фронта очистных работ со стороны Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений к Саамскому карьеру и между фронтами подземных горных работ на нижележащих горизонтах (рис. 1) [4];
- необходимость отработки прибортовых и подкарьерных запасов на гор. +170, +90 и +10 м;
- наличие выработанного пространства Саамского карьера в пределах БЦ без возможного доступа в него из-за ликвидации транспортных коммуникаций;
- наличие мощной геодинамически активной структуры (Саамского разлома) в пределах БЦ;
- увеличение с глубиной абсолютных величин действующих тектонических напряжений и, как следствие, повышение уровня удароопасности при отработке перспективных запасов;
- наличие охранных целиков под промплощадкой Кировского рудника и подъездными железнодорожными путями;

- горно-геологическая информационная система MINEFRAME [5];
- программный комплекс Sigma GT, реализующий метод конечных элементов в объемной постановке и позволяющий проводить моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород с учетом основных геологических и горнотехнических факторов [6].

В данных программных продуктах осуществлялось построение геологических и разных вариантов технологических 3D-моделей и элементов геотехнологии, моделирование развития фронта очистной выемки и оценка геомеханической ситуации для различных вариантов отработки запасов в пределах горизонтов Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений.

Определение производственной мощности рудника

Задача определения максимальной годовой производственной мощности по добыче руды Кировского рудника решалась двумя методами:

- по средней интенсивности разработки шахтного поля, измеряемой годовым понижением очистной выемки;
- по фронту очистной выемки (числу и производительности очистных забоев в одновременной работе).

Метод по возможному фронту очистной выемки является более точным, но он и более трудоемкий, особенно если для отработки запасов одновременно рассматривается несколько сценариев развития очистной выемки на горизонтах (подэтажах) рудника.

Первоначально определялась производительность по элементарной выемочной единице — буродоставочному штреку, далее отдельно по каждому геологическому разрезу и в пределах очистных блоков, затем в пределах подэтажей, горизонтов и суммарная по всему руднику. В результате проведенных исследований создан алгоритм, который позволяет в автоматизированном режиме в среде ГИС MINEFRAME на основании блочной модели создать перспективный план развития подземных горных работ. Ячейки блочной модели содержат информацию о возможно достижимой годовой производительности по добыче руды в пределах каждого геологического профиля, очистного блока и горизонта (подэтажа) при системе разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды со штрековой подготовкой шахтного поля. При этом учитывается время на формирование разрезов на подэтажах, а также выхода нового горизонта и в целом рудника на проектную производственную мощность.

Для планирования развития очистных работ мощных рудных месторождений на основании проведенных исследований ГоИ КНЦ РАН получены зависимости производственной мощности подземного рудника и скорости подвигания очистной выемки от горизонтальной мощности рудной залежи, что важно для формирования перспективного планирования подземных горных работ на рудниках с большой горизонтальной мощностью залежей (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость скорости подвигания очистной выемки от горизонтальной мощности рудной залежи при системе разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды со штрековой подготовкой шахтного поля
Fig. 2. Dependence of stoving advance rate on horizontal thickness of the ore deposit using the sublevel caving mining method

Геомеханическое обоснование горных работ в удароопасных условиях

В ходе выполнения прогнозных исследований НДС массива горных пород были рассмотрены четыре возможных варианта отработки запасов гор. +10 м:

- 1) с разрезкой по Саамскому разлому и ведением горных работ двумя фронтами от разлома в сторону Кукисвумчорра и в сторону Юкспора;
- 2) с разрезкой на Кукисвумчорре и ведением горных работ в сторону Юкспора;
- 3) с двумя разрезками на Кукисвумчорре и Юкспоре и ведением горных работ навстречу друг другу;
- 4) с разрезкой на Юкспоре и ведением горных работ в сторону Кукисвумчорра.

Результаты численного моделирования НДС массива показали, что для любого варианта развития горных работ наблюдается:

- высокий уровень сжимающих напряжений под создаваемыми очистными пространствами;
- разнородное поле напряжений по направлению с преобладающим действием σ_{\max} по простиранию и диагонально рудному телу на удалении от горных работ;
- контрастное поле напряжений в зоне Саамского разлома под карьерной выемкой с перемежающимися зонами растяжения и сжатия;
- ориентировка действующих тектонических напряжений в зонах стыковки горных работ в направлении, близком к простиранию рудного тела;
- замедление процессов обрушения подработанной толщи пород до дневной поверхности, что требует пересмотра действующих инструктивных документов [7].

По результатам численного моделирования установлено, что наиболее безопасной по геомеханическим условиям является схема с единой разрезкой на гор. +10 м в пределах Саамского разлома и развитием горных работ к флангам рудной залежи (рис. 3). При реализации данной схемы сводится к минимуму возможность активизации мощного регионального разлома. В то же время данный вариант не обеспечивает планируемого объема добычи руды Кировского рудника (25 млн т руды в год) после 2028 г.

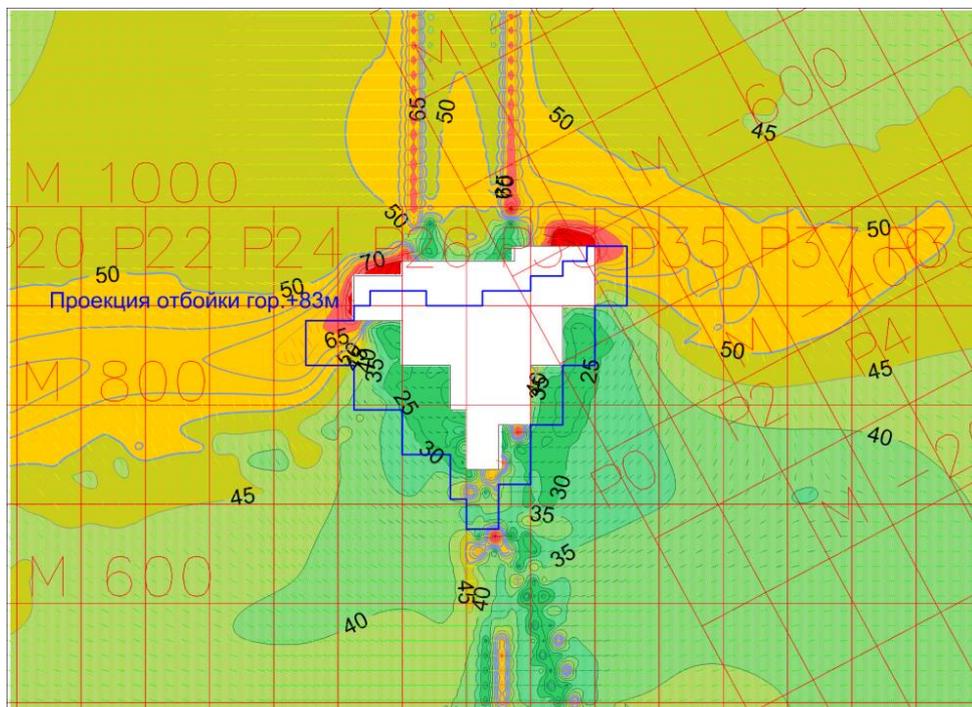


Рис. 3. Распределение σ_{\max} на отм. +58 м при разрезке на гор. +10 м по Саамскому разлому
Fig. 3. Distribution of σ_{\max} at mark +58 m when cutting at the level of +10 m along the Saamsky fault

Обеспечение необходимой производительности в долгосрочной перспективе возможно только при реализации схемы развития очистных работ с двумя разрезами — на Юкспорском (разрез 3) и на Кукисвумчоррском (разрез 14) месторождениях (рис. 4).



Рис. 4. Распределение σ_{\max} на гор. +10 м для варианта с двумя разрезами на Кукисвумчоррском и Юкспорском месторождениях

Fig. 4. Distribution of σ_{\max} at the level of +10 m for the variant with two cuts at the Kukisvumchorr and Yukspor deposits

Развитие работ по данной схеме приводит к формированию блоков-целиков и необходимости их отработки в удароопасных условиях. Поэтому при выборе данного варианта необходимо предусмотреть значительный объем профилактических мероприятий и применение усиленных видов крепления, а также оценить затраты на данные мероприятия. В качестве наиболее безопасного порядка с сохранением необходимой производительности предложено и обосновано опережающее развитие горных работ со стороны Юкспорской залежи и стыковка подземных горных работ на Кукисвумчоррском месторождении на удалении не менее 150 м от Саамского разлома [8].

При анализе результатов численного моделирования НДС массива разработаны региональные мероприятия, обеспечивающие минимизацию уровня геодинамических рисков и удароопасности для выбранного порядка горных работ, заключающиеся в определении:

- наиболее безопасного расположения блоков-целиков между подземными горными работами и их размеров;
- величин опережений фронта очистных работ висячем боку рудной залежи (на 20–40 м) по отношению в лежачему и опережений отработки вышележащих подэтажей по отношению к нижележащим (на высоту подэтажа);
- величин защитных углов фронта очистных работ (45–60°) на разных участках обрабатываемых месторождений.

Кроме этого выполнено прогнозное определение категорий состояния выработок на разных этапах отработки запасов, что необходимо при планировании необходимых видов и объемов крепления, а также локальных разгрузочных мероприятий (рис. 5).

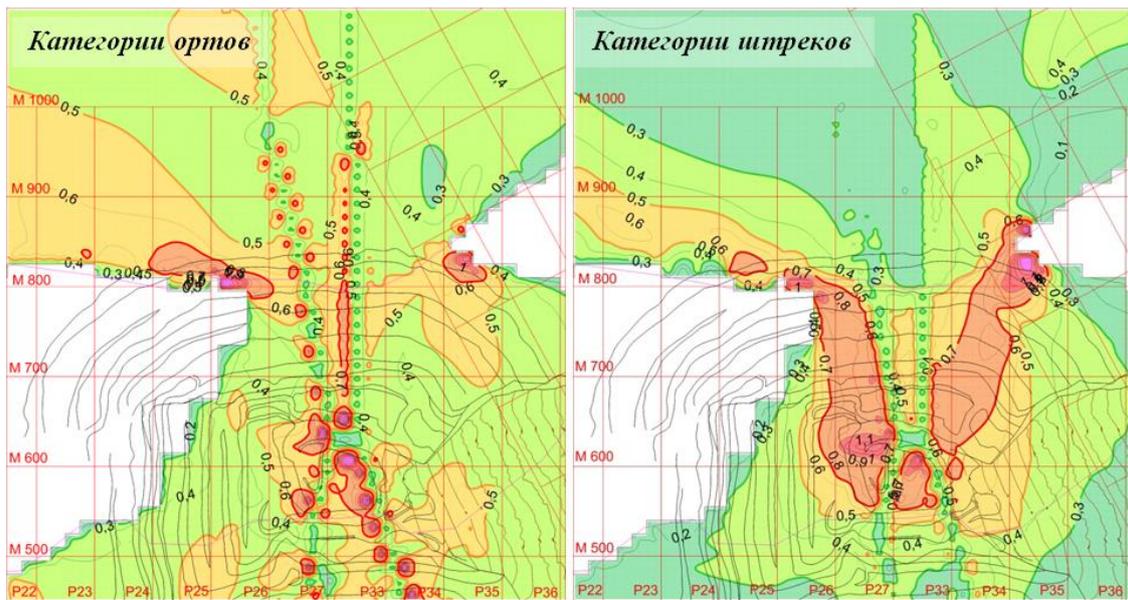


Рис. 5. Расчетные категории выработок под Саамским карьером на гор. +158 м

Fig. 5. Calculated categories of workings under the Saamsky open pit at the level of +158 m

Заключение

В результате комплекса исследований разработаны научно-технические решения, позволяющие вести горные работы по отработке запасов Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений Кировского рудника с увеличением производственной мощности до планируемых показателей в условиях уменьшения мощности рудных тел и необходимости отработки части запасов в стыковочных зонах между открытыми и подземными горными работами, а также вблизи мощной геодинамически активной структуры Саамского разлома.

Определены оптимальное местоположение разрезов и стыковочных зон, порядок прохождения Саамского разлома, параметры системы разработки подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды и разделкой опережающей разгрузочной зоны в висячем боку рудной залежи. Установлена величина оптимального угла фронта очистных работ по отношению к его направлению, обеспечивающая защитный эффект в зоне активного ведения горных работ.

Разработан алгоритм для создания автоматизированного расчета производственной мощности рудника, горизонта, очистного блока и перспективного планирования объемов добычи руды на мощных рудных месторождениях.

Предложенные решения используются при разработке проекта на отработку запасов нижних горизонтов Кировского рудника. Сформулированные принципы безопасной отработки месторождений при интенсификации выемки запасов актуальны и для других месторождений, обрабатываемых на больших глубинах в скальных тектонически напряженных массивах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов В. В., Абрашитов А. Ю., Сахаров А. Н. Состояние и перспективы развития подземной разработки глубокозалегающих месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива // Горн. журн. 2014. № 10. С. 28–33.
2. На Кировском руднике КФ АО «Апатит» отгружена 800-миллионная тонна апатит-нефелиновой руды // Евразийский химический рынок. URL: <http://chemmarket.info/ru/news/view/36725> (дата обращения: 18.04.2019).
3. Глубокий С. С. Корректировка стратегии геологического изучения запасов апатит-нефелиновых руд Хибинского массива в связи с интенсивным освоением глубоких горизонтов месторождений // Горн. журн. 2014. № 10. С. 25–28.
4. Methodological approaches and realization of joining zones mining in the rockburst hazardous conditions / A. A. Kozыrev [et al.] // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2016. Book 1, Vol. 2. P. 565–572.
5. Lukichev S., Nagovitsyn O., Belogorodtsev O. A systemic approach to solving the mining technology tasks based on modeling its objects and processes // Proc. of the 38th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 2017). 2017. P. 29–34.
6. Козырев А. А., Семенова И. Э., Шестов А. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на разных этапах освоения месторождений // Компьютерные технологии при проектировании

и планировании горных работ: сб. тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Апатиты; СПб., 2009. С. 251–256.
7. Указания по управлению обрушением покрывающих пород, охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на рудниках открытого акционерного общества «Апатит» / А. А. Козырев [и др.]; КНЦ Горн. ин-т; ОАО «Апатит». Апатиты, 2002. 51 с.
8. Семенова И. Э., Аветисян И. М., Земцовский А. В. Геомеханическое обоснование отработки запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях // Горн. информ.-аналит. бюл. 2018. № 12. С. 65–73.

Сведения об авторах

Лукичев Сергей Вячеславович — доктор технических наук, директор Горного института КНЦ РАН
E-mail: lu24@goi.kolasc.net.ru

Козырев Анатолий Александрович — доктор технических наук, зав. отделом геомеханики Горного института КНЦ РАН

E-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Семенова Инна Эриковна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: innas@goi.kolasc.net.ru

Белгородцев Олег Владимирович — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: o_belogorodzev@mail.ru

Аветисян Иван Михайлович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: vanavetisyan@yandex.ru

Хомкин Егор Евгеньевич — младший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: sonne.z@mail.ru

Author Affiliation

Sergey V. Lukichev — Doctor of Sciences (Engineering), Director of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: lu24@goi.kolasc.net.ru

Anatoly A. Kozyrev — Doctor of Sciences (Engineering), Chief of the Department of Geomechanics of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Inna E. Semenova — PhD (Engineering), Leading Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: innas@goi.kolasc.net.ru

Oleg V. Belogorodtsev — Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: o_belogorodzev@mail.ru

Ivan M. Avetisyan — PhD (Engineering), Senior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: vanavetisyan@yandex.ru

Igor E. Khomkin — Junior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: sonne.z@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Научное обоснование перспективной отработки апатит-нефелиновых руд на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях / С. В. Лукичев [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 5–12.

Reference

Lukichev Sergey V., Kozyrev Anatoly A., Semenova Inna E., Belogorodtsev Oleg, V., Avetisyan Ivan M., Khomkin Igor E. Scientific Substantiation of the Prospective Apatite-Nepheline Ore Mining at the Great Depths under Complicated Mining and Geological Conditions. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 5–12. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.13-18

УДК: 622.83:550.34

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ МАССИВА ДЛЯ АНАЛИЗА СОБЫТИЯ 9 ЯНВАРЯ 2018 ГОДА НА РАСВУМЧОРРСКОМ РУДНИКЕ

А. А. Козырев, И. Э. Семенова, О. Г. Журавлева, А. В. Пантелеев
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

Представлен пример использования комплексной методики выявления потенциально сейсмически опасных участков массива на удароопасных месторождениях для анализа зоны повышенной сейсмической активности на Расвумчоррском руднике, где произошло мощное сейсмическое событие 9 января 2018 г., в результате которого разрушения произошли на нескольких горизонтах рудника. Установлены возможные причины, условия возникновения и сценарий развития геодинамического явления.

Ключевые слова:

техногенное землетрясение, горнотехническая система, техногенная сейсмичность, геодинамическая безопасность.

AN APPROACH TO IDENTIFY SEISMIC HAZARDOUS AREAS FOR ANALYZING A GEODYNAMIC EVENT AT THE RASVUMCHORR MINE ON JANUARY 9, 2018

Anatoliy A. Kozyrev, Inna E. Semenova, Olga G. Zhuravleva, Aleksey V. Panteleev
Mining Institute of FRC KSC RAS, Apatity

Abstract

The paper describes a practice of the applying of an integrated approach to identify potentially seismic hazardous rock mass areas in the rockburst-hazardous deposits for analyzing a seismic active zone in the Rasvumchorr mine, where large seismic event had occurred on January 9, 2018. The event caused severe damages in several mine horizons. The approach has allowed defining possible causes, conditions of occurrence and a formation scenario for the geodynamic event.

Keywords:

mining-induced earthquake, mining-engineering system, mining-induced seismicity, geodynamic safety.

Введение

Значения информативных индикаторов уровня сейсмической активности массива горных пород являются объективным показателем изменчивости его геодинамического состояния. Дополненные результатами моделирования напряженно-деформированного состояния массива (НДС) с учетом геологического строения и развития горных работ, а также данными о местоположении и параметрах геодинамически активных структур, они дают возможность уточнения параметров зон повышенной сейсмической опасности и определения вероятности реализации мощного сейсмического события. В последние годы именно такой подход развивается в Горном институте КНЦ РАН.

Данный комплексный подход применен для анализа мощного сейсмического события (СС), произошедшего 9 января 2018 г. на Расвумчоррском руднике. Магнитуда события — 3,3 (по данным КоФ ФИЦ ЕГС РАН [1]), гипоцентр находился в лежачем боку центральной части месторождения Апатитовый Цирк на отметке +500 м (по данным Автоматизированной системы контроля состояния массива Расвумчоррского рудника (АСКСМ-Р) Кировского филиала АО «Апатит»). Событие сопровождалось сильным звуковым эффектом, сотрясанием массива

и дневной поверхности, существенными разрушениями выработок и ощущалось работниками Расвумчоррского и Кировского рудника. Разрушению подверглись выработки лежачего бока на отметках от +425 до +530 м (рис. 1). Объем массива, в котором произошли разрушения выработок, составил около 135 тыс. м³.

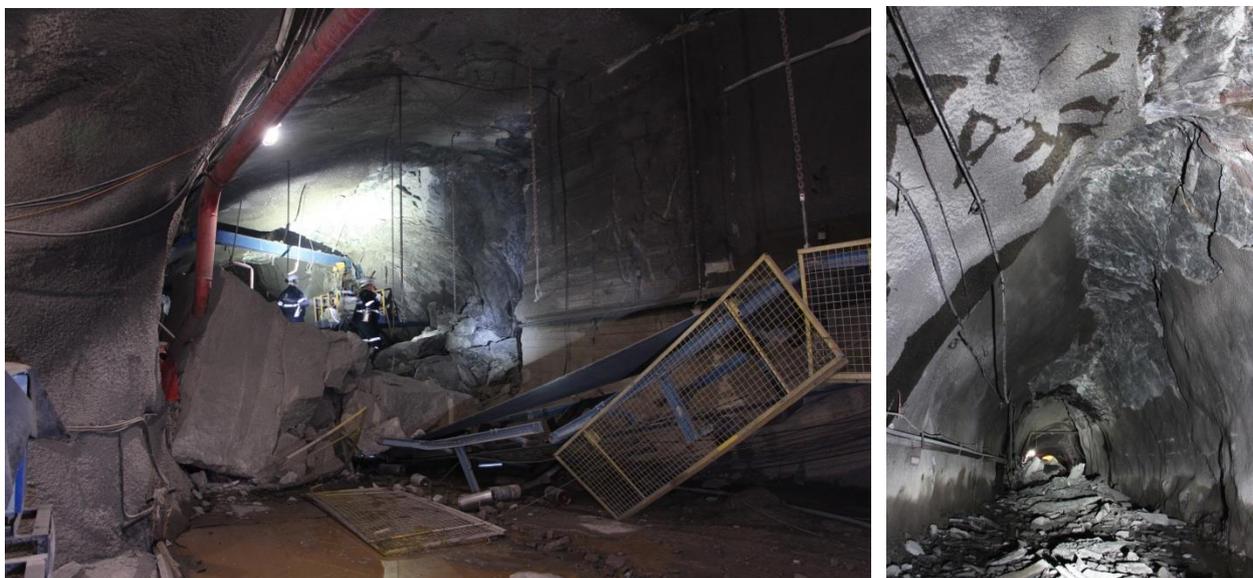


Рис. 1. Примеры разрушений в выработках в результате мощного сейсмического события 09.01.2018

Fig. 1. Structural failures caused by the January 9, 2018 seismic event

Результаты исследований и их обсуждение

Предлагаемый подход основан на двух методах прогноза опасных динамических явлений: по результатам сейсмического мониторинга и по результатам моделирования НДС для конкретных геологических и горнотехнических условий. Подход предполагает три этапа реализации. На первом этапе проводится пространственно-временной вероятностный прогноз сильных сейсмических событий при совместном использовании различных прогностических критериев (фрактального, концентрационного, угла наклона графика повторяемости сейсмических событий, средняя длина разрывов). На основе данных сейсмических наблюдений за длительный период строятся карты вероятностей возникновения сильных сейсмических событий при наличии прогностического признака (т. е. проводится районирование месторождения по типам проявления сейсмичности в течение определенного периода наблюдений (рис. 2, а)), которые сопоставляются с распределением действующих напряжений в этот же период времени.

На втором этапе проводится анализ данных по сейсмическим событиям за период наблюдений не более одного месяца и построение карт сейсмоактивных зон (также с учетом нескольких прогностических критериев), т. е. выявление прогностического признака. Изменение сейсмоактивных зон (их местоположение, конфигурация, динамика) отражает характер действующих напряжений в массиве в процессе ведения горных работ. О повышенном уровне сейсмической опасности может свидетельствовать как значительное увеличение размеров сейсмоактивной зоны, так и увеличение значений комплексного критерия. На данном этапе также происходит комплексирование с расчетными данными параметров поля напряжений для уточненных расчетов в окрестности каждой локализуемой по сейсмическим параметрам зоны (рис. 2, б).

Третий этап — оценка изменения уровня напряжений и происходящей деформации в очаговой зоне с помощью индикаторов энергетического индекса и кумулятивного кажущегося объема. Применение этих критериев позволяет получить более надежную оценку уровня

сейсмической опасности в выявленных потенциально опасных участках [2, 3]. Для СС 9 января 2018 г. подтверждается опасное состояние массива, характеризующееся понижением энергетического индекса и одновременным ускоряющимся возрастанием кумулятивного кажущегося объема. Это свидетельствует о неоднородности поля напряжений и реализующихся процессах деформации на рассматриваемом участке массива горных пород (*более детально результаты третьего этапа анализа представлены на конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» в Москве в июне 2019 г.*).

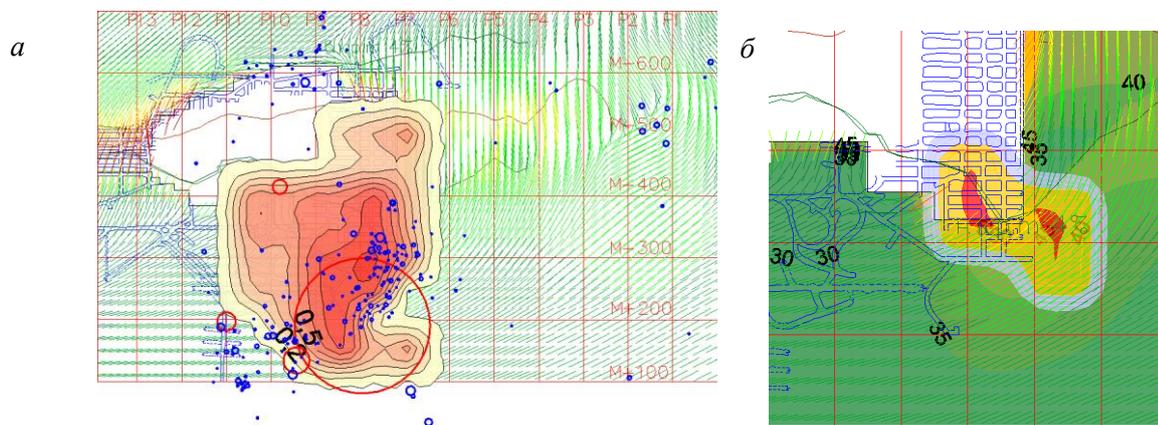


Рис. 2. Карта вероятностей возникновения сильных сейсмических событий и распределения напряжений (на 1 января 2018 г., Расвумчоррский рудник, район СС, проекция на отгм. + 452 м), совмещенная с фактическим проявлением сейсмических событий в течение января 2018 г. (а); зона повышенной сейсмоактивности за час до реализации СС (б)

Fig. 2. Probability map of occurrence of severe seismic events and stress distribution (January 1, 2018, Rasvumchorr mine, seismic event area, + 425 meters mark projection), which are combined with the actual manifestation of seismic events during January 2018 (a); high seismic activity zone an hour before the seismic event (b)

В результате комплексного анализа геологических, геодинамических, геомеханических, технологических факторов и данных о сейсмической активности массива сделаны следующие выводы [4]:

- произошедшее 9 января 2018 г. событие классифицировано специалистами Горного института КНЦ РАН как техногенное землетрясение;
- событие является результатом взброса лежачего бока по полого-наклонной окисленной зоне мощностью 0,6–1,0 м (разлом 1 на рис. 3, а), проходящей по подстилающим породам согласно залеганию рудного тела;
- величины действующих касательных напряжений (τ_{\max}) в районе реализации мощного сейсмического события близки к критическим, одна из площадок действия τ_{\max} совпадает по направлению с полого-наклонной окисленной зоной (рис. 3, б), что подтверждает высказанную в предыдущем пункте гипотезу;
- массовый взрыв 8 января 2018 г. мог послужить триггером мощного динамического явления в случае достижения самим массивом горных пород предельно неустойчивого состояния; в течение 2017 г. число взрывов в данном районе возросло, что нашло отражение в характере сейсмических проявлений: наблюдается ускоряющееся возрастание как количества сейсмических событий, так и суммарной выделившейся энергии (рис. 4, 5);
- развитие событий после подвижки происходило по следующему сценарию: смещение блока пород, ограниченного разломами 1, 2 и 3 (рис. 3, а), в результате чего произошел выброс породы в конвейерном штреке № 2; смещение массива относительно торкрет-бетонного крепления и вспучивание подошвы в конвейерном штреке № 1 с образованием трещин отрыва в плоскости перпендикулярной разлому 1.

Полученные результаты и их сопоставление с техногенными землетрясениями 1989 и 2010 гг. позволяют утверждать, что события, реализующиеся в виде взброса по структурным нарушениям подстилающих пород лежачего бока, вызывают наиболее мощный сейсмический отклик массива и могут привести к серьезным разрушениям подземных и наземных объектов.

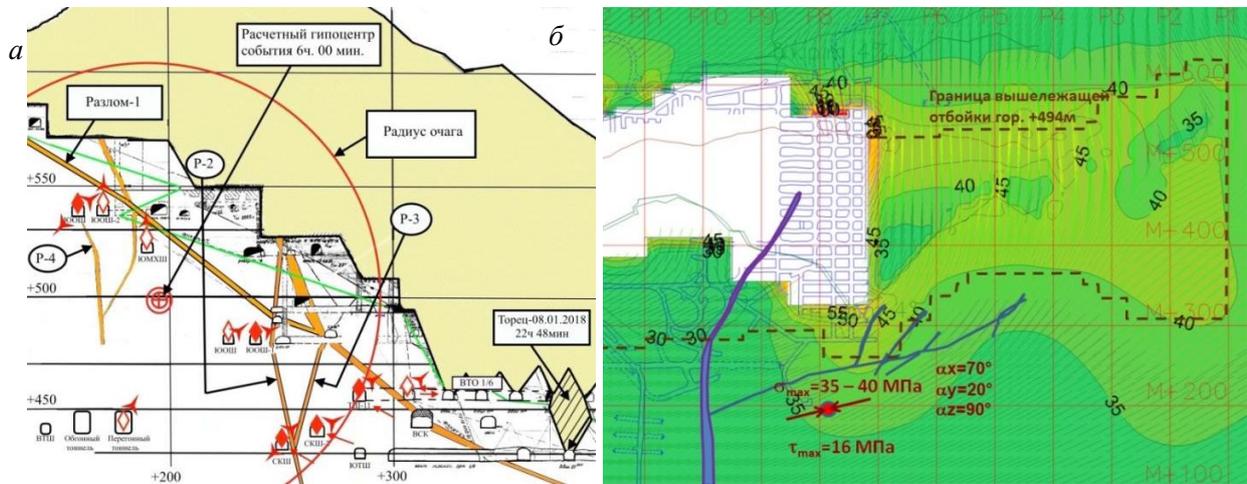


Рис. 3. Проекция гипоцентра сейсмического события, торцевого взрыва и участков разрушений на разрезе 7 (а); расчетные данные о поле напряжений при состоянии горных работ на начало 2018 г. (б)
 Fig. 3. Projection of the seismic event hypocenter, end explosion and areas of destruction at section 7 (a); calculation data on stress field for the mining conditions at the beginning of 2018 (b)

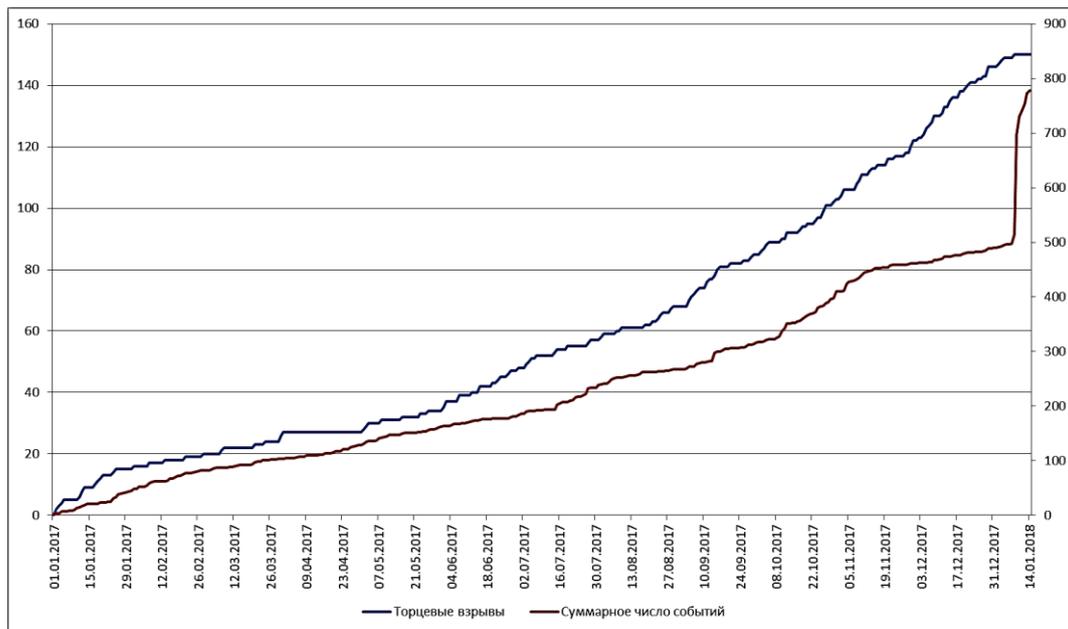


Рис. 4. Число сейсмических событий и торцевых взрывов, зарегистрированных в районе техногенного землетрясения за период с 1 января 2017 г. по 14 января 2018 г.
 Fig. 4. Number of seismic events and end explosions registered in the area of the technogenic earthquake over the period of January 1, 2017 to January 14, 2018

Таким образом, на примере техногенного землетрясения, произошедшего на Расвумчоррском руднике, проанализирована совокупность геомеханических, горнотехнических и геолого-геофизических факторов. Это позволило уточнить механизм мощных сейсмических событий, реализующихся в большинстве случаев в породах лежачего бока Хибинских апатит-нефелиновых месторождений.

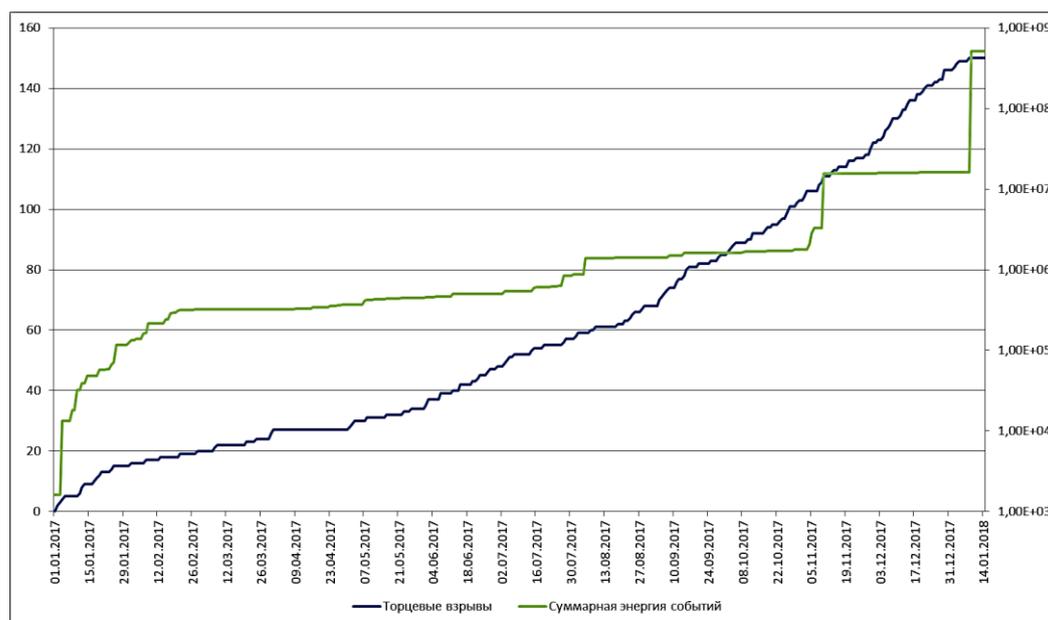


Рис. 5. Суммарная энергия сейсмических событий и число торцевых взрывов, зарегистрированных в районе техногенного землетрясения за период с 1 января 2017 г. по 14 января 2018 г.

Fig. 5. Total energy of seismic events and number of end explosions registered in the area of the technogenic earthquake over the period of January 1, 2017 to January 14, 2018

Заключение

Показаны возможности методики выявления потенциально сейсмически опасных участков массива на удароопасных месторождениях, которая отличается последовательным уточнением индикаторов опасного состояния для выявления зон повышенной сейсмической опасности и определения вероятности реализации мощного сейсмического события. Предложенный комплексный подход к прогнозу опасных динамических явлений основан на совмещении данных вероятностной оценки зон, потенциально опасных по возникновению мощных сейсмических событий энергетического класса 6–8, с данными численного 3D-моделирования НДС массива горных пород при учете основных геологических, геомеханических и горнотехнических факторов на нескольких масштабных уровнях. Совместное применение различных индикаторов уровня сейсмической опасности и параметров НДС конкретного участка при развитии горных работ позволяет увеличить надежность прогноза зон повышенной сейсмической опасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кольский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук». URL: <http://www.krsc.ru/?q=ru/news> (дата обращения: 29.04.2019). 2. Van Aswegen G., Butler A. Applications of quantitative seismology in SA gold mines // Proc. of the 3rd International Symposium in Rockbursts and Seismicity in Mines. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 261–266. 3. Mendecki A. J. Seismic monitoring in mines. London: Chapman and Hall, 1997. 262 p. 4. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике / А. А. Козырев [и др.] // Горн. информ.-аналит. бюл.: [науч.-техн. журн.]. 2018. № 12. С. 74–83.

Сведения об авторах

Козырев Анатолий Александрович — доктор технических наук, профессор, зав. отделом геомеханики Горного института КНЦ РАН

E-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Семенова Инна Эриковна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: innas@goi.kolasc.net.ru

Журавлева Ольга Геннадьевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru

Пантелеев Алексей Владимирович — ведущий инженер Горного института КНЦ РАН

E-mail: PanteleevAV@goi.kolasc.net.ru

Author Affiliation

Anatoliy A. Kozyrev — Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Chief of the Department of Rock Mechanics of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Inna E. Semenova — PhD (Engineering), Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: inna@goi.kolasc.net.ru

Olga G. Zhuravleva — PhD (Engineering), Senior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru

Aleksey V. Panteleev — Leading Engineer of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: PanteleevAV@goi.kolasc.net.ru

Библиографическое описание статьи

Применение методики выявления сейсмически опасных участков массива для анализа события 9 января 2018 года на Расвумчоррском руднике / *А. А. Козырев [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 13–18.

Reference

Kozyrev Anatoliy A., Semenova Inna E., Zhuravleva Olga G., Panteleev Aleksey V. An Approach to Identify Seismic Hazardous Areas for Analyzing a Geodynamic Event at the Rasvumchorr Mine on January 9, 2018. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 13–18. (In Russ.).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ОХРАННЫХ ЦЕЛИКОВ В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ

С. В. Лукичев, И. Э. Семенова, А. В. Земцовский, Е. В. Громов
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

На основе комплексных натурных определений параметров поля напряжений и компьютерного моделирования геомеханических процессов в подрабатываемом массиве горных пород при подземной отработке сближенных удароопасных месторождений Хибинского массива установлены особенности его деформирования, приводящие к повышению устойчивости подработанной толщи в условиях действия высоких сжимающих напряжений. С учетом данного фактора выполнено научное обоснование параметров безопасной отработки временно неактивных запасов месторождения Олений ручей.

Ключевые слова:

тектонические напряжения, подземный рудник, карьер, охранный целик, горный отвод, неактивные запасы, численное 3D-моделирование, напряженно-деформированное состояние.

THE DEFINITION OF THE PROTECTIVE PILLAR BOUNDARIES IN TECTONICALLY STRESSED ROCK MASSES

Sergey V. Lukichev, Inna E. Semenova,
Alexander V. Zemtsovskii, Yevgeny V. Gromov
Mining Institute of KSC RAS, Apatity

Abstract

Based on complex field observation of the stress field parameters and computer modeling of geomechanical processes in the undermined rock mass during underground mining of the contiguous rockburst hazardous deposits of the Khibiny massif, the features of its deformation have been established, which lead to an increase in the stability of the undermined strata under the acting of high compressive stresses. Considering this factor, the scientific substantiation of the safe mining parameters of temporarily inactive reserves of the Oleniy Ruchey deposit, was performed.

Keywords:

tectonic stresses, underground mine, open pit, protecting pillar, patented claim, inactive reserves, numerical 3D modelling, stress-strain state.

Введение

Актуальной тенденцией освоения Хибинских апатит-нефелиновых месторождений является близость формируемых открытых и подземных очистных пространств, что обуславливает особенности геомеханических условий [1], влияющих на процессы деформирования подработанного массива, безопасность горных работ и производительность производственных процессов. Действие высоких исходных тектонических напряжений в Хибинском массиве и склонность пород к хрупкому разрушению предопределяют отнесение отрабатываемых месторождений к категории склонных и опасных по горным ударам, что требует дополнительных региональных и локальных мероприятий по разгрузке массива. В настоящее время существенный объем запасов сближенных месторождений находится во временных охранных целиках, отработка которых в ближайшие десятилетия маловероятна. Идея работы заключается в обосновании возможности пересмотра границ охранных целиков на основе комплексных исследований геомеханических и геотехнологических процессов в толще подработанного массива, учитывающих дополнительное горизонтальное сжатие пород. Исследования реализованы

с использованием современных средств компьютерного моделирования, разработанных в ГоИ КНЦ РАН, — горно-геологической информационной системы MINEFRAME и программного комплекса по оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) в объемной постановке Sigma GT.

Объект исследования

Объектом исследования является месторождение Олений ручей, расположенное в юго-восточной части Хибинского массива. Его запасы составляют 370 млн т. Рудные тела в пределах месторождения сконцентрированы в двух ярусах — верхнем мощностью 200 м и нижнем мощностью от 50 до 330 м, разделенных безрудной толщей мощностью 200–300 м. В настоящее время на северо-восточном фланге месторождения запасы верхнего яруса дорабатываются карьером, в нижнем ярусе осуществляется строительство капитальных горных выработок и начата отработка подземным способом. С юго-запада на расстоянии примерно 250 м находится Ньоркпахкский карьер, а также запасы участка Суолуайв, предполагаемого в будущем к отработке подземным способом (рис. 1). Вследствие близости Ньоркпахкского карьера и запасов участка Суолуайв значительная часть месторождения Олений ручей (65 % балансовых запасов до отм. –100 м) законсервирована в охранном целике. Границы целика определены проектной документацией в соответствии с «Инструкцией по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений» [2]. Угол сдвижения принят равным 70° .

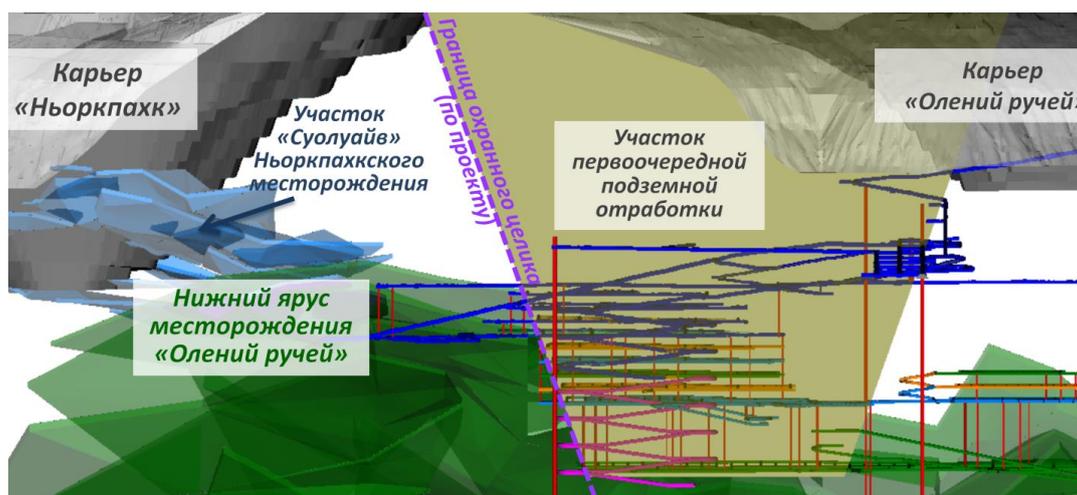


Рис. 1. 3D-модели объектов комбинированной разработки в ГИС MINEFRAME

Fig. 1. 3D models of objects of combined mining in Mining GIS MINEFRAME

Основными геомеханическими факторами, оказывающими влияние на процессы обрушения подработанной толщи пород, являются тип напряженно-деформированного состояния и параметры поля напряжений массива горных пород. В действующих инструктивных документах [3, 4] используется упрощенный подход к определению параметров и построению охранных целиков, не учитывающий дополнительное горизонтальное сжатие, характерное для тектонически напряженных массивов. «Указания по управлению обрушением покрывающих пород...» [5] в части построения предохранительных целиков также опускают данный фактор. Оработка подземных запасов апатитовых месторождений Хибин с применением систем с обрушением руды и вмещающих пород показала, что добиться полного обрушения подработанной толщи в таких условиях достаточно сложно. Так, на месторождении Апатитовый цирк, где мощность рудного тела в несколько раз больше, а начальная глубина выемки запасов меньше на 100 и более метров, полное обрушение подработанных пород произошло при формировании очистной выемки протяженностью около 1 км.

Методы исследования

Для определения безопасных параметров подземных горных работ при корректировке границ охранного целика выполняли оценку напряженно-деформированного состояния массива горных пород для различных вариантов отработки. Расчеты проведены методом конечных элементов в объемной постановке, реализованной в программном комплексе Sigma GT [6]. Данное программное обеспечение разработано в Горном институте КНЦ РАН и успешно применяется на горнорудных предприятиях России [7].

Основой для задания граничных условий являлись натурные данные по измерению напряжений в выработках подземного рудника, а также ранее разработанная модель месторождений Олений ручей и Ньоркпахкское [8]. При создании модели учитывали сложный рельеф дневной поверхности, параметры рудных тел, свойства руд и вмещающих пород, отметки горизонтов и подэтажей подземного рудника (рис. 2).

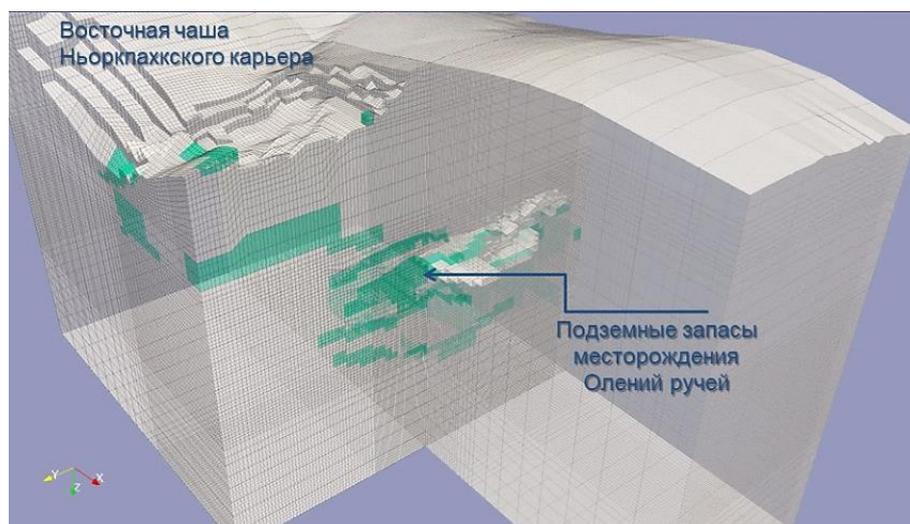


Рис. 2. Трехмерная конечно-элементная модель месторождения Олений ручей

Fig. 2. 3D finite elements model of the Oleniy Ruchey deposit

Наиболее детально модель разбита в области ведения горных работ, где размер каждого элемента составляет $10 \times 10 \times 5$ м. Модель ориентирована в соответствии с рудничной координатной сеткой и содержит 1640 тыс. элементов, ее размеры в плане 2420×2050 м, дно на отм. -1000 м.

Анализ распределения максимальных напряжений σ_{\max} позволяет выделить наиболее удароопасные участки массива на разных этапах выемки подземных запасов. Данные о минимальных напряжениях σ_{\min} являются определяющими при определении параметров обрушений подработанной толщи пород. Анализ их значений и распределение в подработанной толще пород дают возможность оценить влияние подземных горных работ на предохранительный целик Ньоркпахкского карьера.

Результаты численного моделирования НДС

Проведено многовариантное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород с уточнением параметров рудных тел и последовательным развитием очистной выемки до разреза $6+40$ м. Также варьировались параметры опережений вышележащих горных работ к нижележащим в пределах защитных углов 45 , 60 и 75° . Увеличение угла развивающегося фронта работ при этом давало возможность дополнительного приращения включаемых в отработку запасов. При построении границ очистной выемки учитывались действующие границы горного отвода Ньоркпахкского месторождения и уточненные параметры рудных тел месторождения Олений ручей.

Схема вариантов моделирования по развитию горных работ в сторону Ньоркпахкского карьера приведена на рис. 3.

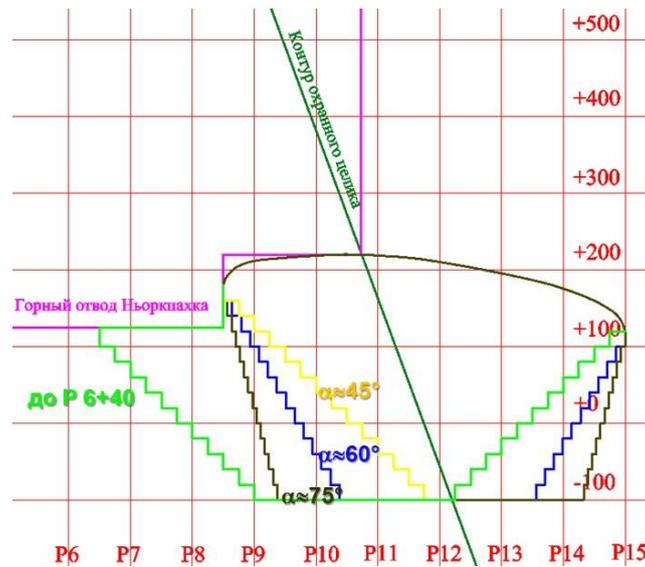


Рис. 3. Схема моделирования вариантов развития горных работ

Fig. 3. The scheme of modeling variants for mining development

Анализ прогнозного распределения σ_{\max} при варьировании параметров опережений вышележащих подэтажей к нижележащим (с генеральными углами 45, 60 и 75°) показал, что с увеличением угла растет зона концентрации сжимающих напряжений σ_{\max} у верхней части фронта горных работ (рис. 3), развивающегося в сторону Нюркпахжского карьера. Это может менять геодинамический режим участка вблизи горного отвода и в целом негативно сказываться на состоянии горных выработок вблизи фронта. На рис. 4 видно, что зоны максимальной концентрации напряжений также приурочены к дну создаваемого обнажения.

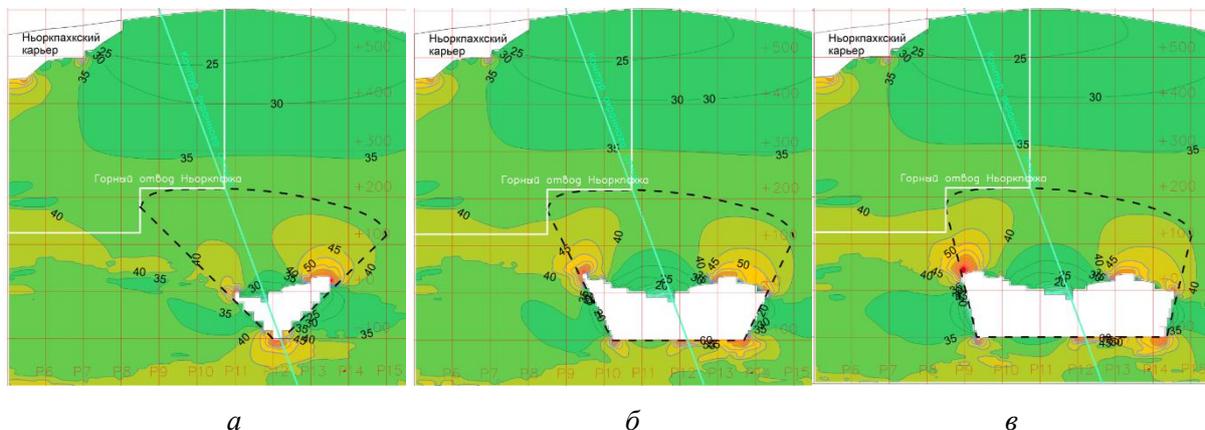


Рис. 4. Распределение максимальных напряжений при опережении горных работ с генеральными углами 45° (а), 60° (б) и 75°(в)

Fig. 4. Distribution of maximum stresses in advance of mining with the main angles: $a — 45^\circ$, $b — 60^\circ$ and $c — 75^\circ$

При анализе минимальных напряжений полагали, что в зонах действия растягивающих напряжений σ_{\min} (отрицательные расчетные величины) возможно развитие трещин отрыва. То есть по ним можно судить о параметрах нарушенных зон в подработанном массиве. На рис. 5 такие зоны показаны розовым цветом и ограничены жирной красной линией.

Анализ распределения напряжений в подработанных породах показал, что зоны растягивающих напряжений в кровле создаваемых обнажений развиваются достаточно медленно, что связано с общим высоким уровнем сжатия, обусловленным действием в массиве пород месторождения тектонических напряжений.

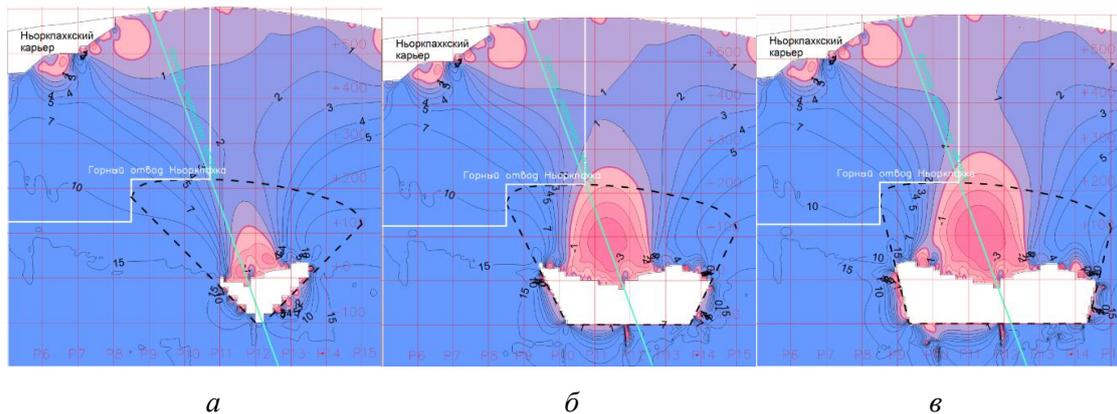


Рис. 5. Распределение минимальных напряжений при опережении горных работ с генеральными углами 45° (а), 60° (б) и 75° (в)

Fig. 5. Distribution of minimum stresses in advance of mining with the main angles: а — 45° , б — 60° and в — 75°

В начальный период ведения очистных работ в охранном целике зона растягивающих напряжений формируется по центру создаваемого обнажения, при дальнейшем развитии горных работ и достижении ими подкарьерного пространства максимум растяжений по-прежнему не захватывает горный отвод. У борта карьера изменений параметров НДС не наблюдается, зона растягивающих напряжений σ_{\min} сохраняется в приповерхностной части борта карьера, где действующие сжимающие напряжения минимальны.

Распределение σ_{\min} существенно меняется при различных параметрах опережений. Так, при увеличении угла с 45° до 60° происходит рост зоны растягивающих напряжений, в которой могут формироваться и развиваться трещины отрыва. Верхняя граница данной зоны уходит на 100 и более метров выше в подработанный массив и достигает высотной отметки примерно +250 м. При дальнейшем изменении угла опережений до 75° увеличиваются параметры зоны растяжений как в плане, так и по высотным отметкам — верхняя граница находится в районе отм. +300 м. На поверхности также наблюдаются отдельные зоны растягивающих напряжений. Следует учитывать, что подработанный массив принимали однородным без нарушений, то есть при наличии естественных трещин, ориентированных в направлении действия σ_{\max} , возможно увеличение размера зоны потенциального обрушения и выход ее на дневную поверхность для углов опережений более 60° . Поэтому рекомендуется развитие горных работ с опережением вышележащих подэтажей к нижележащим, которое приблизительно равно высоте подэтажа.

В то же время при предлагаемом угле опережений 45° создаются условия частичного обрушения пород висячего бока и заполнения очистного пространства в достаточном объеме для формирования породной подушки, что является необходимым условием для защиты рабочих зон подземного рудника от динамического воздействия обрушения горной массы.

После уточнения модели были рассмотрены также расчетные варианты с выбранным углом опережений 45° и последовательным развитием очистной выемки с шагом в 40 м для оценки возможности дополнительного приращения запасов. Рассмотрим вариант с продвижением горных работ до разреза 7 (рис. 6). Как видно, в этом случае напряженно-деформированное состояние подработанных пород меняется в значительной мере. В нижней части горного отвода Ньюркапха в разрезах 7–9 увеличивается уровень сжимающих напряжений. При этом зона потенциальных разрушений в кровле создаваемого очистного пространства захватывает часть горного отвода в разрезах 10–11.

Продвижение горных работ в сторону Ньюркапхского карьера возможно только в случае отсутствия нарушения пород в границах горного отвода. Поэтому границей продвижения очистной выемки следует принять разрез 8, так как при развитии очистной выемки до него существенных изменений напряженно-деформированного состояния пород в рамках горного отвода соседнего месторождения не происходит.

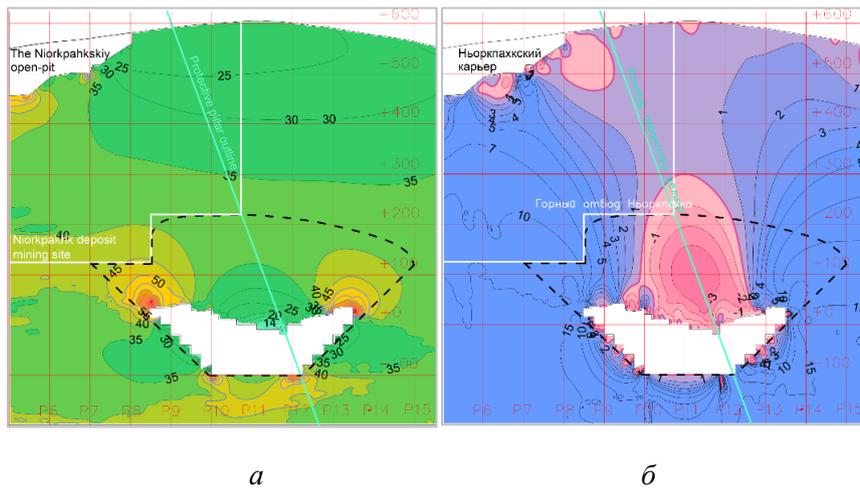


Рис. 6. Распределение максимальных (а) и минимальных (б) напряжений по М + 400 м при развитии горных работ до разреза 7 с углом опережений 45°

Fig. 6. Distribution of maximum (a) and minimum (b) stresses along M + 400 m cross-section in the mining development to section 7 with the angle of 45 °

Обоснование параметров отработки запасов при отсутствии самообрушения подработанной толщи

Чтобы обеспечить безопасное извлечение запасов без оставления целиков в период ведения горных работ без самообрушения подработанной толщи пород, предложен вариант системы подэтажного обрушения руды с частичным принудительным обрушением налегающих вмещающих пород скважинами с увеличенной ЛНС и выпуском руды через траншейное днище (рис. 7).

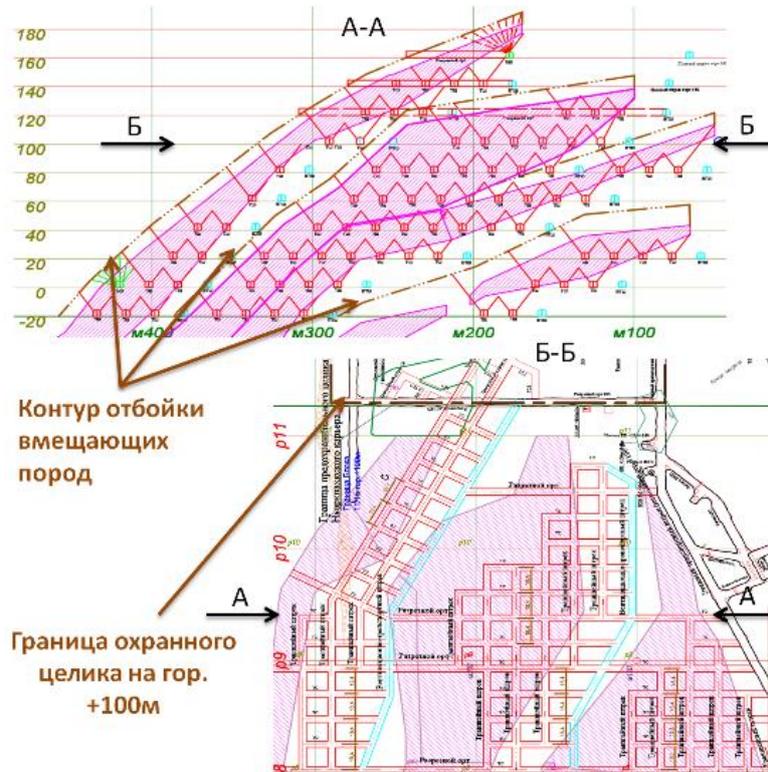


Рис. 7. Система подэтажного обрушения с частичным принудительным обрушением налегающих вмещающих пород и выпуском руды на траншейное днище

Fig. 7. System of sublevel caving with trench ore drawing

Обоснована минимально необходимая толщина предохранительной породной подушки ($h_{п.п. \min}$), обеспечивающей защиту горных выработок от воздушных ударов. Для отбиваемой секции усредненных размеров с площадью 40,8 м² при сечении выработки 19,15 м² и одном выпускном отверстии $h_{п.п. \min}$ составит:

$$h_{п.п. \min} = \frac{K}{1+0,25K} \cdot H_{вп} = \frac{0,96}{1+0,25 \cdot 0,96} \cdot 20 = 15,5,$$

где $H_{вп}$ — высота подэтажа, м.

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5,$$

где $K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$ — коэффициенты, учитывающие аэродинамическое сопротивление породной подушки, обрушающихся пород и выпускных выработок;

K_4 — коэффициент, учитывающий степень изолированности подземной пустоты;

K_5 — коэффициент, учитывающий прочие факторы (неравномерность толщины подушки и среднего диаметра куска слагающих ее пород и т. п.) и резерв.

Оценка возможного прироста запасов и необходимые меры контроля

Предлагаемый вариант развития горных работ с выемкой запасов за пределами охранного целика позволяет увеличить количество запасов 1-й очереди отработки на 76,9 % (табл.). При этом обеспечивается прирост запасов 1-го этажа на 190,7 %, что позволит избежать резкого продолжительного спада объемов добычи при окончании открытых горных работ.

Оценка прироста проектных запасов в отн. +180/–100 м с учетом частичного вовлечения в отработку запасов временного охранного целика

Evaluation of the increase of project reserves at the levels of +180/–100 m with the partial mining of the protecting pillar reserves

Этаж Level	Запасы руды по проекту, тыс. т Project reserves, thousand t	С учетом прирезки (предлагаемый вариант), тыс. т Taking into account the cutting (proposed option), thousand t	Прирост запасов (предлагаемый вариант), % Reserves growth (proposed option), %
+180/+100 м +180/+100 m	1 827	5 311	190,7
+100/0 м +100/0 m	6 261	15 999	155,5
0/–100 м 0/–100 m	18 498	25 728	39,1
Всего Overall	26 586	47 038	76,9

При принятии решения об изменении границ охранного целика необходимо предусмотреть комплекс мероприятий по контролю за состоянием подработанного массива горных пород, который позволит оценить происходящие изменения и обеспечить сохранность объектов на дневной поверхности и в пределах горного отвода Ньюркапхка при ведении горных работ в разрезах 8–11.

Комплекс мероприятий должен включать:

- уточнение параметров напряженного состояния пород натурными методами (метод разгрузки, метод дискования керна и др.);
- мониторинг геомеханического состояния массива горных пород на нескольких масштабных уровнях, обеспечивающий решение задач по комплексной оценке состояния массива на основе геофизических методов контроля;

• математическое моделирование НДС и устойчивости подработанных пород с учетом уточненных параметров поля напряжений, геологического строения массива, а также фактических и запланированных на ближайший период очистных работ.

В результате мероприятий выполняется прогноз напряженно-деформированного состояния подработанного массива и определяется его устойчивость. При необходимости проводится корректировка технологии подземных горных работ.

Выводы

Таким образом, анализ многовариантных расчетов НДС и развития зон критических растягивающих деформаций в кровле создаваемых обнажений и у дневной поверхности показал, что подрабатываемый массив остается устойчивым при выемке запасов месторождения Олений ручей в отметках +180...–100 м максимально до разреза 8 с формированием опережения вышележащих подэтажей к нижележащим под углом 45° и обеспечением необходимой системы мониторинга за состоянием подработанного массива. Это позволит дополнительно вовлечь в отработку 26,5 млн т балансовых запасов и обеспечит выход рудника на проектную мощность раньше на 1 год, чем это предусмотрено проектной документацией. При этом период стабильной отработки запасов в отметках +180...–100 м вырастет на 4 года.

Подход, примененный в данной работе к оценке подработанного массива, может использоваться для уточнения параметров охранных зон при отработке смежных месторождений в условиях тектонического сжатия пород и обеспечивать повышение полноты извлечения запасов и снижение рисков техногенных катастроф при ведении горных работ в условиях взаимного влияния открытых и подземных очистных пространств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Methodological approaches and realization of joining zones mining in the rockburst hazardous conditions / A. A. Kozыrev [et al.] // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2016. Book 1, Vol. 2. P. 565–572.
2. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. М.: Недра, 1988. 112 с.
3. Инструкция о порядке утверждения мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок (РД 07-113-96): утв. постановлением Госгортехнадзора России от 28.03.1996 № 14.
4. Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок месторождений руд цветных металлов с неизученным процессом сдвигения горных пород. Л.: ВНИМИ, 1986.
5. Указания по управлению обрушением покрывающих пород, охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на рудниках открытого акционерного общества «Апатит» / А. А. Козырев [и др.]; Кольский научный центр РАН; Горн. ин-т, ОАО «Апатит». Апатиты, 2002. 51 с.
6. Козырев А. А., Семенова И. Э., Шестов А. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на разных этапах освоения месторождений // Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ: тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием. 2009. С. 251–256.
7. Методика регионального прогноза удароопасности и состояния массива пород и выбора технических решений по обеспечению безопасности и эффективности горных работ / А. А. Козырев [и др.] // Инновационный потенциал Кольской науки. Апатиты, 2005. С. 52–56.
8. Kozыrev A. A., Semenova I. E., Zemtsovskiy A. V. Investigation of Geomechanical Features of the Rock Mass in Mining of Two Contiguous Deposits under Tectonic Stresses // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 8–9.

Сведения об авторах

Лукичев Сергей Вячеславович — доктор технических наук, директор Горного института ФИЦ КНЦ РАН
E-mail: lu24@goi.kolasc.net.ru

Семенова Инна Эриковна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института ФИЦ КНЦ РАН

E-mail: innas@goi.kolasc.net.ru

Земцовский Александр Васильевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Горного института ФИЦ КНЦ РАН

E-mail: zemtsovskiy@yandex.ru

Громов Евгений Викторович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Горного института ФИЦ КНЦ РАН

E-mail: evgromov@list.ru

Author Affiliation

Sergey V. Lukichev — Doctor of Sciences (Engineering), Director of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: lu24@goi.kolasc.net.ru

Inna E. Semenova — PhD (Engineering), Leading Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: innas@goi.kolasc.net.ru

Alexander V. Zemtsovskii — PhD (Engineering), Senior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: zemtsovskiy@yandex.ru

Yevgeny V. Gromov — PhD (Engineering), Senior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: evgromov@list.ru

Библиографическое описание статьи

Определение границ охранных целиков в тектонически напряженных массивах / *С. В. Лукичев [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 19–27.

Reference

Lukichev Sergey V., Semenova Inna E., Zemtsovskii Alexander V., Gromov Yevgeny V. The Definition of the Protective Pillar Boundaries in Tectonically Stressed Rock Masses. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 19–27. (In Russ.).

РАЙОНИРОВАНИЕ ПРИБОРТОВОГО МАССИВА ПОРОД КАРЬЕРА «ЖЕЛЕЗНЫЙ» ПО УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОТКРЫТОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА СЕЙСМИЧНОСТИ

С. А. Козырев, А. С. Калужный

ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

Представлены результаты сейсмических наблюдений при производстве массовых взрывов, совершенных за весь период наблюдений. Выполнено районирование карьера в плане по степени сейсмической восприимчивости. В программном пакете SVSlope комплекса SVOoffice дана оценка устойчивости прибортового массива пород с поиском потенциальной поверхности ослабления как в автоматическом, так и в ручном режиме в случае наличия поверхностей ослабления. По результатам оценки устойчивости предложено районирование карьерного поля. Получена сходимость результатов районирования карьера по степени сейсмической восприимчивости и по коэффициенту запаса устойчивости, что вкуче позволяет более качественно определять опасные зоны в карьере.

Ключевые слова:

прибортовой массив, карьер, сейсмическая восприимчивость, коэффициент сейсмичности, массовый взрыв, оценка устойчивости, поверхность ослабления.

ZONING THE ADJACENT ROCK MASS OF THE ZHELEZNY OPEN PIT IN TERMS OF THE OPEN GEOTECHNOLOGY ELEMENTS STABILITY, TAKING INTO ACCOUNT THE SEISMICITY COEFFICIENT

Sergey A. Kozyrev, Anton S. Kaluzhny

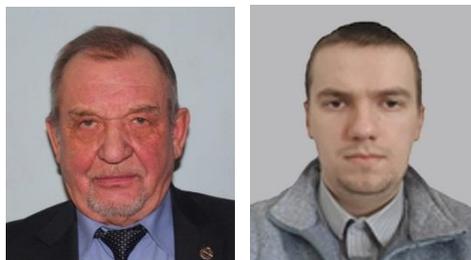
Mining Institute of KSC RAS, Apatity

Abstract

The paper presents the results of seismic observations during the production of large-scale blasts performed over the entire observation period. The Zhelezny open pit was zoned in terms of seismic susceptibility. The adjacent rock mass stability was assessed by using the SVSlope package of the SVOoffice software with the search for a potential weakening surface, both in automatic and manual mode in the case of weakening surfaces. According to the stability assessment results the authors have proposed zoning of the open pit field. The convergence of the open pit zoning results was obtained according to the degree of seismic susceptibility and the safety factor, which makes it possible to better determine the hazardous areas in the open pit.

Keywords:

adjacent rock mass, open pit, seismic susceptibility, seismicity coefficient, large-scale blast, stability assessment, attenuation surface.



За последние 50 лет глубина крупных действующих рудных карьеров как в нашей стране, так и за рубежом, увеличилась до отметки 500 и более метров. При этом углы наклонов бортов в связи с этим достигают значений 50° [1, 2]. В связи с этим важную роль в безопасности ведения горных работ на больших глубинах приобретает устойчивость элементов открытой геотехнологии.

Преобладающим фактором, влияющим на устойчивость уступов, сложенных прочными скальными породами, является регулярное динамическое воздействие массовых взрывов [3, 4]. Именно это воздействие в случае превышения допустимой скорости смещения для рассматриваемого участка борта зачастую является причиной локальных обрушений уступов на большинстве карьеров. В связи с этим анализ реакции массива на действия массовых взрывов является важной задачей при оценке устойчивости бортов карьеров и уступов.

Определение количественных параметров сейсмического действия взрыва в конкретных горно-геологических условиях карьеров осуществляется на основании решения равенства между допустимой скоростью смещения и той скоростью, которая формируется в среде при взрыве заряда массой Q на расстоянии R от сооружения. При этом для оценки скорости смещения V применяется следующая формула [5, 6]:

$$V = k_c \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^n, \text{ см,} \quad (1)$$

где k_c — коэффициент сейсмичности; Q — масса заряда; R — расстояние от точки события до приемника; n — показатель степени затухания.

В результате исследований, выполненных на карьере рудника «Железный» Ковдорского ГОКа, установлено, что скорость колебаний зависит от свойств и состояния массива горных пород и условий взрывания. Поэтому по данной зависимости, наряду с определением допустимой массы заряда для конкретных условий взрывания, можно оценить уровень сейсмической восприимчивости (реакции массива горных пород) уступов на различных участках борта карьера на динамическое воздействие и районировать карьер по этому фактору, что в сочетании с геолого-структурным районированием позволяет выделить потенциально опасные участки.

Оценка сейсмической восприимчивости и ее анализ

По результатам мониторинга массовых взрывов на карьере рудника «Железный» Ковдорского ГОКа получен большой массив данных по скоростям смещения в различных зонах карьера в зависимости от приведенного расстояния (рис. 1).

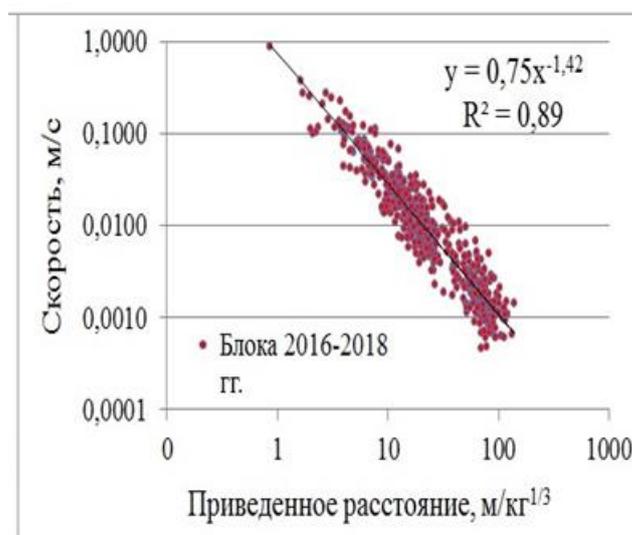


Рис. 1. Зависимость изменения скорости смещения от приведенного расстояния за период с 2016 по 2018 гг.

Fig. 1. Dependence of the change in the displacement velocity on the reduced distance for the period 2016–2018

Изменение скорости смещения от приведенного расстояния описывается следующей эмпирической зависимостью:

$$v = 0,75 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{ст(max)}}}{r} \right)^{1,42}. \quad (2)$$

Для оценки сейсмической восприимчивости, в качестве численного показателя удобнее всего использовать коэффициент сейсмичности, который интегрально отражает состояние массива горных пород на пути распространения сейсмических волн. Тогда, преобразуя формулу (1), получаем:

$$k_{c(1,5)} = v_{\max} \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q_{\text{ст(max)}}}} \right)^{1,5}. \quad (3)$$

Зная координаты X и Y места установки сейсмоприемников при каждом измерении и соответствующие значения коэффициента сейсмичности k_c , получаем числовой массив (X, Y, k_c) , обработка которого позволяет получить «томограмму» распределения коэффициентов сейсмичности k_c на плане карьера.

Распределение коэффициентов сейсмичности при коэффициенте затухания 1,5 (далее $k_{c(1,5)}$) в карьерном пространстве за период измерений 2009–2013 и 2016–2018 гг. приведено на рис. 2. Зоны с повышенным коэффициентом сейсмичности (см. рис. 2, выделены красными линиями).

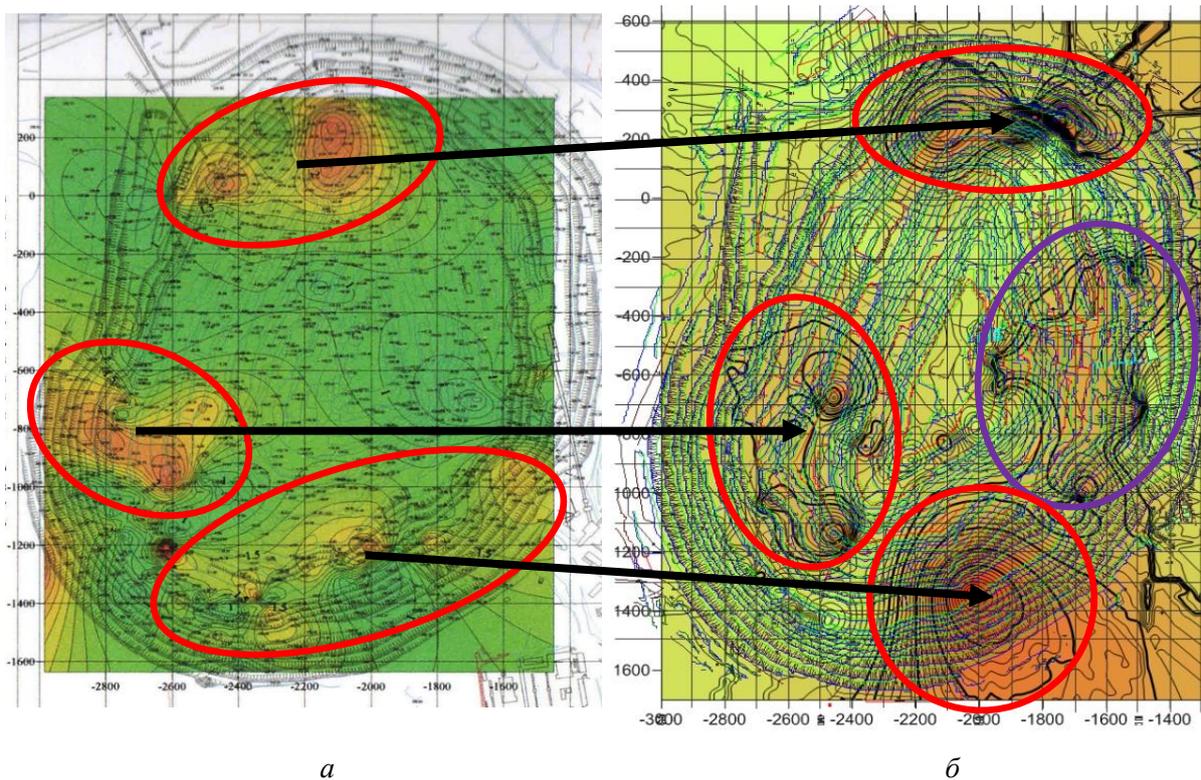


Рис. 2. Распределение коэффициентов сейсмичности при коэффициенте затухания 1,5 (далее $k_{c(1,5)}$) в карьерном пространстве за период измерений 2009–2013 (а) и 2016–2018 гг. (б) с выделением зон с повышенным коэффициентом сейсмичности (на рисунке выделено красными линиями)

Fig. 2. Distribution of seismicity coefficients with an attenuation coefficient of 1,5 (hereinafter $k_{c(1,5)}$) in the open pit space for the measurement period 2009–2013 (a) and 2016–2018 (b), and the indication of the zones with an increased seismicity coefficient (highlighted by red lines)

За указанный промежуток времени произошли следующие изменения расположения зон с повышенным коэффициентом сейсмичности:

- северо-западная область сохранила свои очертания и сместилась в сторону севера;
- западная область также сохранилась и несколько расширилась по оси Y (север-юг);
- обширная юго-восточная область уменьшилась в размерах примерно вдвое;
- образовалась отдельная область на восточном борту карьера в районе РДКК (выделена синим цветом).

Таким образом, постоянный контроль динамического нагружения уступов позволяет оценивать состояние массива горных пород в прибортовой части массива и выявлять наиболее опасные участки, производство взрывных работ вблизи которых необходимо вести с особой осторожностью.

Оценка устойчивости борта карьера методом предельного равновесия

Для оценки устойчивости использовался программный продукт SVOffice с пакетом SVSlope. В качестве расчетного выбран метод Моргенштейна — Прайса [7, 8], рекомендованный нормативным документом [9]. Данный метод основан на решении двух уравнений, одно из которых удовлетворяет общему равенству моментов, другое — общему равновесию действующих горизонтальных сил. Метод зарекомендовал себя с положительной стороны при оценке устойчивости откосов в скальных массивах как Кольского региона [10], так и за рубежом [11].

При определении коэффициентов запаса устойчивости учитывались следующие факторы: сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент структурного ослабления, выявленные поверхности ослабления, уровень грунтовых вод.

При обосновании расчетных схем особое внимание было уделено зонам выветривания и коэффициентам структурного ослабления. Для каждой расчетной схемы разреза проводили поиск потенциальной поверхности ослабления как в автоматическом, так и в ручном режиме в случае наличия поверхностей ослабления.

Результаты оценки устойчивости борта карьера

По результатам оценки устойчивости борта карьера была получена база данных значений коэффициентов устойчивости (K_{3y}). Для построения визуальной картины распределения значений K_{3y} в плане результаты были вынесены на профили, а затем перенесены на план карьера (рис. 3).

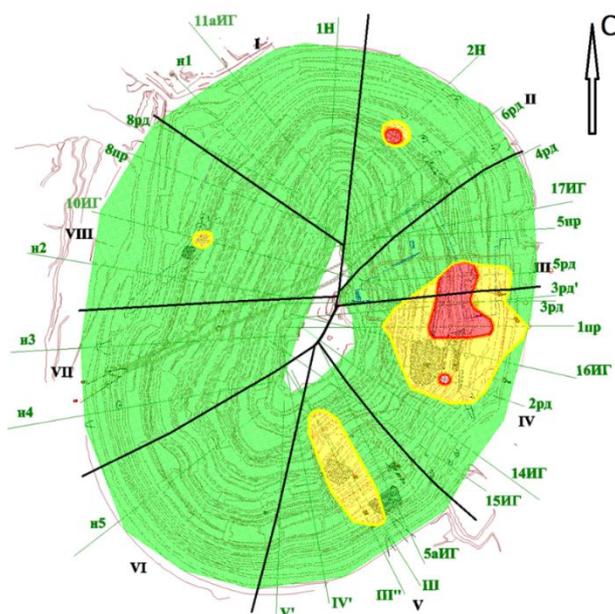


Рис. 3. Схема районирования борта карьера по коэффициенту запаса устойчивости:
 ■ — устойчивая зона ($K_{3y} \geq 1,3$); ■ — зона предельной устойчивости ($1 \leq K_{3y} < 1,3$); ■ — неустойчивая зона ($K_{3y} < 1$); I–VIII — инженерно-геологические секторы; 1Н, 2Н... — инженерно-геологические профили

Fig. 3. The scheme of the open pit wall zoning by the sustainability coefficient:
 ■ — stable zone ($C_{su} \geq 1,3$); ■ — ultimate stability zone ($1 \leq C_{su} < 1,3$); ■ — unstable zone ($C_{su} < 1$);
 I–VIII — engineering-geological sectors; 1Н, 2Н... — engineering-geological profiles

Если сравнить результаты распределения зон с повышенным коэффициентом сейсмичности $k_{c(1,5)}$ в карьерном пространстве за период измерений за 2016–2018 гг. и выполненную оценку устойчивости за 2017–2018 гг., то можно выделить несколько зон (рис. 4): зоны с недостаточной устойчивостью и неустойчивые сосредоточены в основном на восточном и юго-восточном участке борта карьера (II и III) и приурочены к разломным зонам, падающим в направлении очистного пространства; небольшие участки недостаточной устойчивости в северной (I) и западной частях и приурочены также к разломным зонам в этих областях.

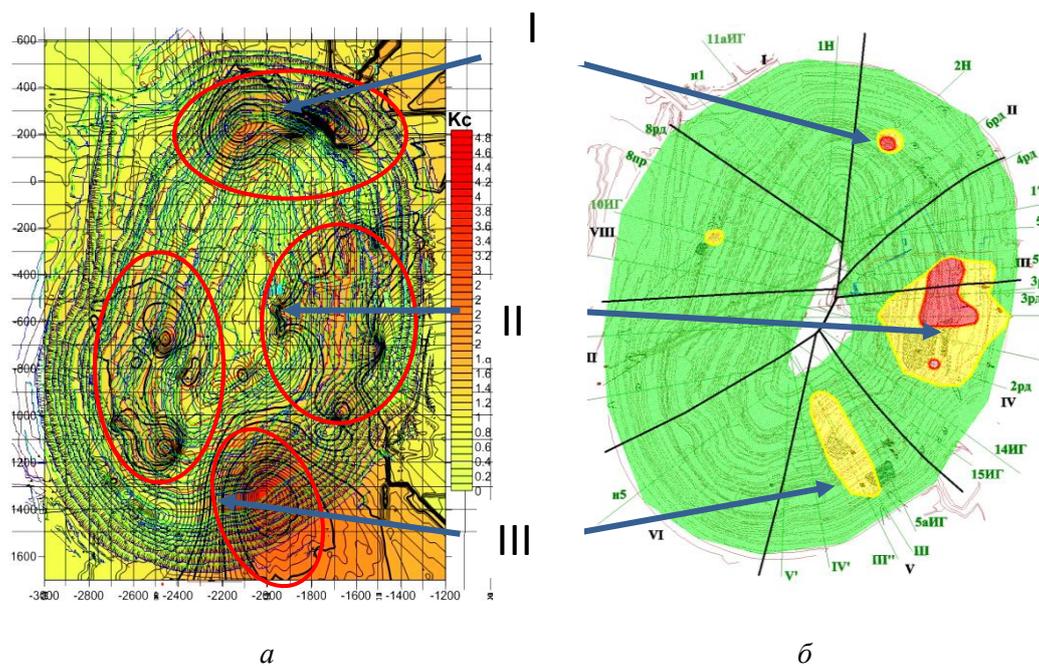


Рис. 4. Местоположение зон повышенных значений реакции массива горных пород на взрывные воздействия (а) и зон пониженной устойчивости прибортового массива в карьере рудника «Железный», определенных в результате оценки коэффициента запаса устойчивости ($K_{3y} \leq 1,3$) (б)

Fig. 4. Location of zones with the increased values of rock mass response to explosive effects (а) and areas of reduced stability of the adjacent rock mass in the Zhelezny mine open pit, determined as a result of a stability factor assessment ($C_{su} \leq 1,3$) (б)

Если сопоставить места всех задокументированных деформаций уступов с полученной «томограммой», то можно отметить, что все области четко отражают местоположение основных деформаций, произошедших в карьере. Появление восточной области связано с обрушением, которое произошло 24 августа 2015 г. Таким образом, распределение коэффициента сейсмичности в карьерном пространстве, а именно его повышенные значения говорят о том, что данный участок борта является наиболее сейсмочувствительным и производство взрывных работ на таких участках и вблизи них следует производить с особой осторожностью.

В результате выполненных исследований можно сделать вывод, что для условий массива пород карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК» «томограмма» распределения повышенного коэффициента сейсмичности с коэффициентом затухания 1,5 дополняет результаты аналитической оценки устойчивости. Такой комплексный подход совмещенного анализа дает возможность качественно определять опасные зоны в карьере, что позволяет более безопасно вести горные работы в карьерном пространстве. В дальнейшем планируется развитие данного подхода, а также применение его на других объектах Кольского региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концептуальные основы оптимизации конструкции бортов карьеров Кольского полуострова в конечном положении / Н. Н. Мельников [и др.] // Труды 8-го Междунар. симп. «Горное дело в Арктике». СПб., 2005. С. 2–14.
2. Мельников Н. Н., Козырев А. А. Изменение геодинамического режима геологической среды при ведении крупномасштабных горных работ на глубоких карьерах // Горн. информ.-аналит. бюл.: [науч.-техн. журн.]. Спецвып. Глубокие карьеры. 2015. С. 7–22.
3. Фокин В. А. Методические аспекты анализа технологической информации при производстве буровзрывных работ в условиях карьеров. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 133 с.
4. Особенности сейсмического действия зарядов контурных скважин в технологии заоткоски уступов карьера / В. А. Фокин [и др.] // Горн. журн. 2011. № 10. С. 50–53.
5. Садовский М. А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов. М.: Изд-во АН СССР, 1946. 28 с.
6. Ataei M., Zare M. Evaluation of Blast-Induced Damage Effects on Underground // 7th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, SGEM. Albania, 2007.
7. Morgenstern N. R., Price V. E. The analysis of the stability

of general slip surface // *Geotechnique*. 1965. Vol. 15. P. 70–93. **8.** *Johari A., Mousavi S.* An analytical probabilistic analysis of slopes based on limit equilibrium methods // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2018. November. P. 1–15. **9.** СП 11-105-97. Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II: Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М.: ПНИИИС Госстроя России, 2000. 118 с. **10.** *Потапов Д. А., Калюжный А. С., Кузнецов Н. Н.* Оценка устойчивости борта карьера «Куркенпахк» АО «Олкон» при помощи программных комплексов Galena 6.0 и Svslope 2D // *Горн. информ.-аналит. бюл.: [науч.-техн. журн.]*. Спецвып. Глубокие карьеры. 2015. С. 175–182. **11.** *Batali L.* Slope Stability Analysis Using the Unsaturated Stress Analysis. CaseStudy // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 143. P. 284–291.

Сведения об авторах

Козырев Сергей Александрович — доктор технических наук, заведующий лабораторией Горного института КНЦ РАН

E-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

Калюжный Антон Сергеевич — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: anton26@goi.kolasc.net.ru

Author Affiliation

Sergej A. Kozyrev — Doctor of Sciences (Engineering), Head of Laboratory of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

Anton S. Kalyuzhnyy — Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: anton26@goi.kolasc.net.ru

Библиографическое описание статьи

Козырев, С. А. Районирование прибортового массива пород карьера «Железный» по устойчивости элементов открытой геотехнологии с учетом коэффициента сейсмичности / *С. А. Козырев, А. С. Калюжный* // *Вестник Кольского научного центра РАН*. — 2019. — № 2 (11). — С. 28–33.

Reference

Kozyrev Sergej A., Kaluzhny Anton S. Zoning the Adjacent Rock Mass of the Zhelezny Open Pit in Terms of the Open Geotechnology Elements Stability, Taking into Account the Seismicity Coefficient. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 28–33. (In Russ.).

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ВЗРЫВА СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

С. А. Козырев, В. Н. Камянский

ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

На основе использования программного продукта Ansys Autodyn и интегрированной в него модели разрушения горных пород под действием динамических нагрузок разработан комплекс численных моделей взрыва скважинных и шпуровых зарядов, обеспечивающих решение задач взрывания: смежных скважинных зарядов в двухмерной и объемной постановке при одно- и разновременном их инициировании; контурных скважин при постановке откосов уступов на конечный контур; скважинных зарядов при веерном их расположении; комплекта шпуров при проведении горной выработки. Предложенные численные модели позволяют решать актуальные задачи взрывного дела.

Ключевые слова:

взрывчатое вещество, взрыв, скважинные заряды, предварительное щелеобразование, сейсмическое действие взрыва, численное моделирование.

DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODELS OF BOREHOLE CHARGES BLASTING IN ROCK MASSIF

Sergey A. Kozyrev, Victor N. Kamyanskiy

Mining Institute of KSC RAS, Apatity

Abstract

Using Ansys Autodyn software and its model of rocks failure under dynamics load, the complex of numerical models of borehole charges blasting has been developed that providing a solution to the tasks as follows: blasting of adjacent borehole charges in two-dimensional and three-dimensional setting with simultaneous and multi-temporal initiation, blasting of contour boreholes when setting the slopes of the benches on the final contour, blasting of borehole charges at the fan location and blasting of a set of blast holes at tunneling. The proposed numerical models allow to solve the actual problems of blasting work.

Keywords:

explosive, blast, borehole charges, pre-split blasting, seismic action of explosion, numerical simulation.



Введение

В последние годы в мире, в том числе и в России, наблюдается рост объемов добычи полезных ископаемых, а следовательно, и объемов буровзрывных работ. При этом необычайно остро стоит вопрос управления дробящим и сейсмическим действием взрыва в горных породах на больших глубинах для повышения эффективности и обеспечения безопасного ведения горных работ и оптимизации затрат при проведении работ.

Проблема разрушения горного массива в целях обеспечения качественного и управляемого дробления горных пород, несмотря на постоянное совершенствование технологии взрывных работ, была и остается одной из важнейших в горном производстве. Учитывая, что затраты на взрывные работы в себестоимости добычи полезных ископаемых занимают до 30 %, а КПД взрыва на дробление не превышает нескольких процентов, то изучение физических процессов и явлений при взрывах и дальнейшее совершенствование технологии взрывных работ становится первоочередной задачей для развития горного дела.

Методика исследований

Одним из перспективных методов изучения механизма разрушения массива горных пород взрывом является применение математического моделирования, в основу которого положен метод конечных элементов (МКЭ). В настоящее время МКЭ — один из наиболее разработанных методов, позволяющих моделировать явления и процессы с максимальным их приближением к реальности. Теоретические основы МКЭ хорошо освещены в работах зарубежных исследователей, среди которых стоит отметить труды К.-Ю. Бате, Р. Галлагера, О. Зенкевича, Л. Сегерлинда и др. [1–4].

Применение средств численного моделирования дает возможность исследовать процессы и явления, изучение которых на практике по ряду причин не представляется возможным или экономически нецелесообразно, кроме того, оно также позволяет минимизировать затраты, уточнять теорию, проверять выводы и получать более полное наглядное представление о сути происходящих явлений. На сегодняшний день лидером в области разработки программных решений является компания Ansys с программными продуктами LS-Dyna и Autodyn.

Для моделирования процесса взрывного разрушения массива горных пород скважинными зарядами использовался расчетный модуль системы инженерного анализа Ansys — Autodyn, который наиболее полно, при всех прочих равных условиях, отражает физику исследуемого явления, что многократно подтверждено накопленным мировым опытом при использовании данного продукта. Данный программный продукт находит свое применение в решении задач динамики конструкций, быстропротекающих нестационарных течений, задач из области физики взрыва и удара, отклика конструкций на ударно-волновое воздействие.

Моделирование физических процессов в Ansys Autodyn реализуется посредством численного решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, представляющей собой совокупность законов сохранения энергии, импульса и массы, а также дополнительных уравнений посредством различных числовых алгоритмов, именуемых «решателями». Для осуществления процесса моделирования в Autodyn реализовано четыре типа решателей: лагранжев, эйлеров, произвольный лагранжево-эйлеровый, а также бессеточный решатель SPH (гидродинамика сглаженных частиц).

Основные решатели: лагранжев — для описания поведения твердой среды при взрыве и эйлеров — для описания поведения продуктов взрыва и их взаимодействия с твердыми телами, что является общепризнанным подходом и широко используется при решении задач взрыва [5–10].

Основопологающим при моделировании процесса разрушения горной породы является корректный выбор модели прочности, характеризующей сопротивление породы сдвигу/растяжению [11]. Ввиду того, что в Ansys Autodyn реализовано достаточное количество моделей прочности, то в целях обоснования наиболее подходящей для описания поведения горных пород при взрыве проведены серии вычислительных экспериментов в двухмерной постановке, в которых сравнивалась динамика трещинообразования на образцах горной породы дисковой формы при применении: RHT — модели прочности, модели Друкера — Прагера, Купера — Саймонда, билинейного упрочнения и модели прочности фон Мизеса (рис. 1).

По результатам проведенных вычислительных экспериментов определено, что все применяемые модели прочности имеют достаточно высокую степень адекватности полученным на практике результатам. Для моделирования процесса разрушения скальных пород наиболее подходящей является RHT-модель [12, 13]. В связи с этим в дальнейшем при разработке моделей взрывания скважинных и шпуровых зарядов в массиве используется данная модель прочности.

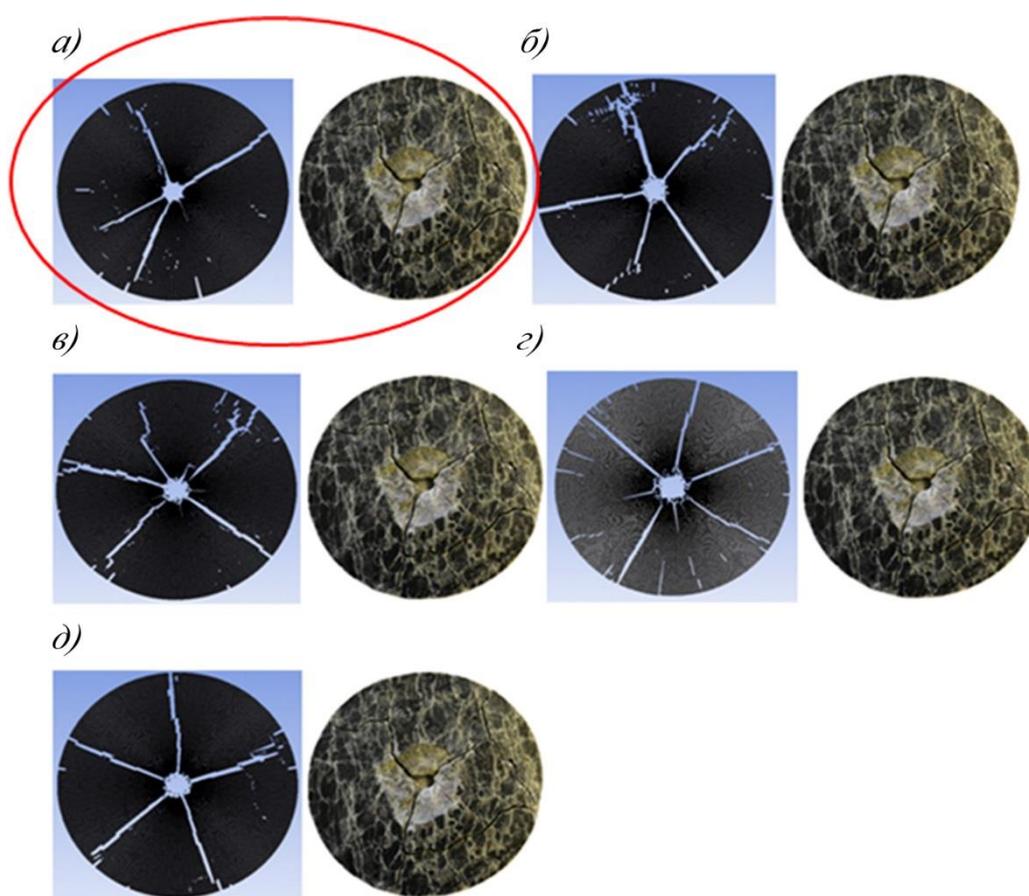


Рис. 1. Результаты трещинообразования на момент времени 300 мкс с применением моделей прочности:
 а — RHT-модель; б — модель Друкера — Прагера; в — модель Купера — Саймонда;
 г — модель билинейного упрочнения; д — модель фон Мизеса

Fig. 1. Results of cracking at the time of 300 mcs using various stability models:
 а — RHT-model; б — Drucker — Prager model; в — Cooper — Simond model;
 г — bilinear hardening model; д — von Mises model

Результаты исследований

В 2016–2018 гг. в лаборатории технологических процессов при добыче полезных ископаемых ГоИ КНЦ РАН с использованием Ansys Autodyn проведены серии вычислительных экспериментов по разрушению массива горных пород системой скважинных и шпуровых зарядов, при этом разработаны следующие модели:

1. Модель взрывания смежных скважинных зарядов в объемной постановке.

В модели рассматривается взрыв двух смежных скважинных зарядов взрывчатого вещества (ВВ), расположенных в массиве горных пород (рис. 2). Величина линии наименьшего сопротивления (ЛНС) — 5,5 м; длина колонкового заряда ВВ — 10 м; диаметр скважин — 250 мм; расстояние между скважинами — 7 м; величина забойки — 5 м; масса заряда в скважине — 650 кг. Инициирование скважинных зарядов — обратное.

Разработанная модель позволяет произвести оценку поля напряжений (рис. 3, 4), а также характера разрушения массива (рис. 5) при взрывании двух скважин с различными интервалами замедлений.

По результатам численного моделирования в трехмерной упругопластической постановке произведена оценка поля напряжений и развития трещин в массиве, а также получены аналитические зависимости изменения эквивалентных напряжений от времени при взрыве скважинных зарядов с различными интервалами замедления между ними.

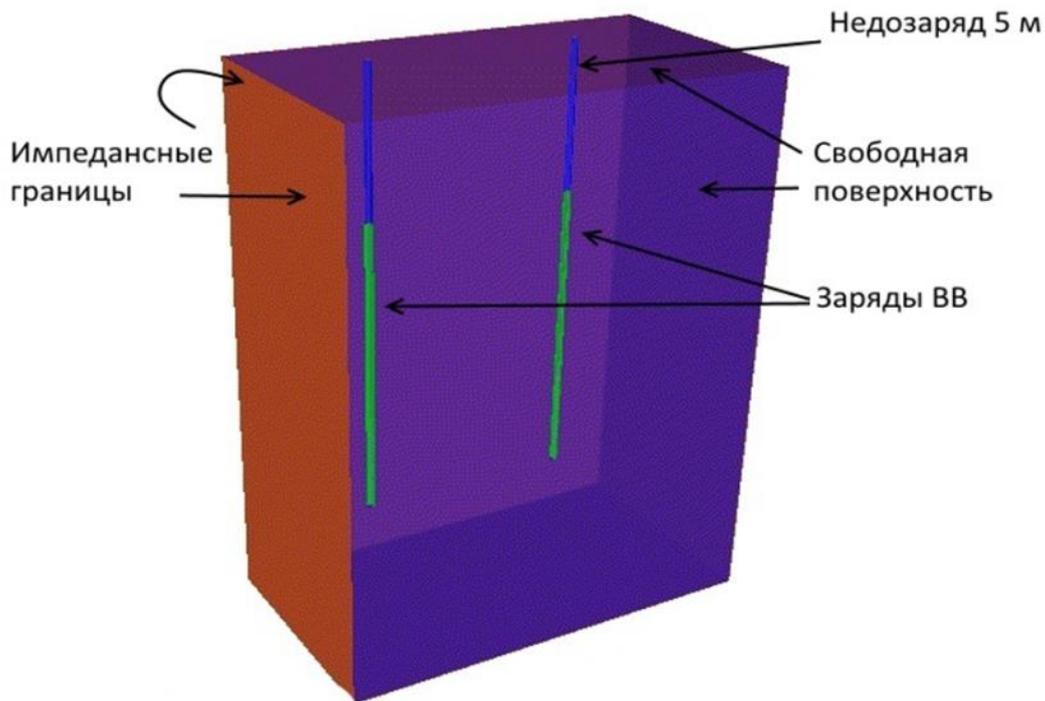


Рис. 2. Исходная геометрия модели
Fig. 2. Primary geometry of the model

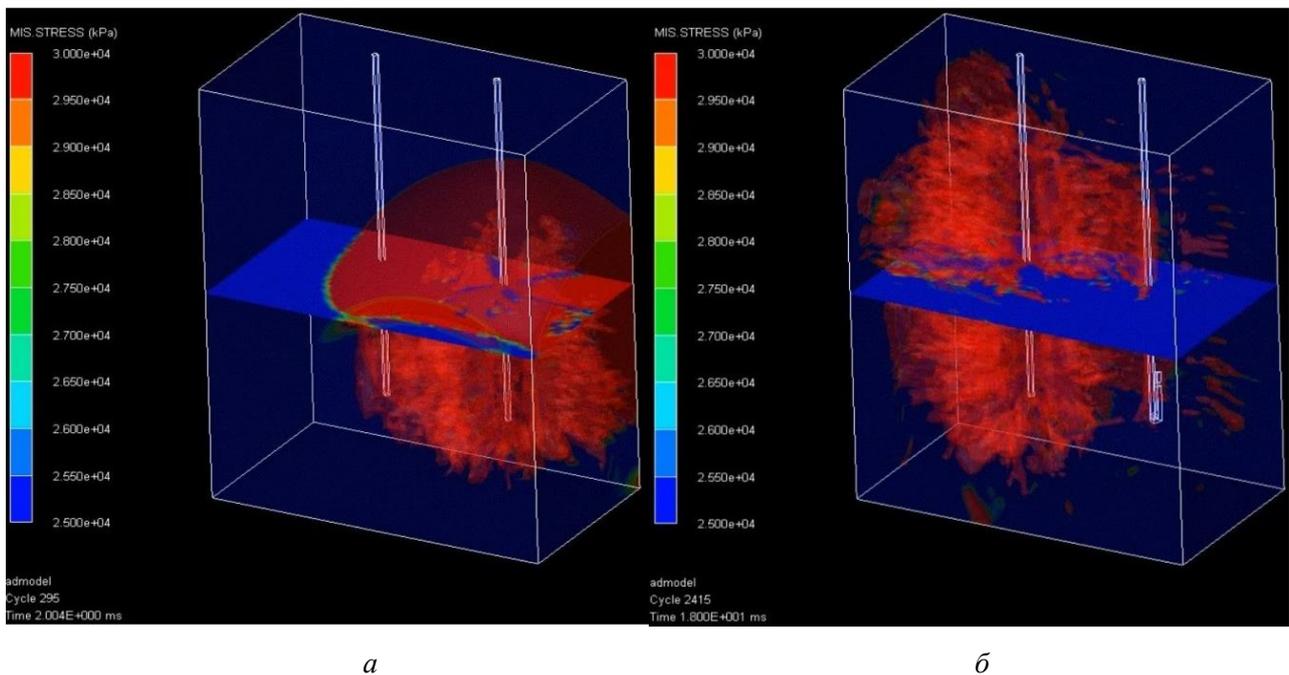


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в массиве после инициирования первого заряда на момент времени 2 (а) и 18 (б) мс

Fig. 3. Equivalent stresses in rock massif after the initiation of the first charge at the time of 2 (а) and 18 (б) mcs

Определено, что повышение степени дробления горной массы при реализации поскважинного взрывания зарядов в схемах КЗВ обеспечивается за счет выбора интервала замедления 15 мс в диагонали, при котором взаимодействие волн напряжений от взрывов смежных зарядов обеспечивает условия многократного воздействия на зону трещинообразования.

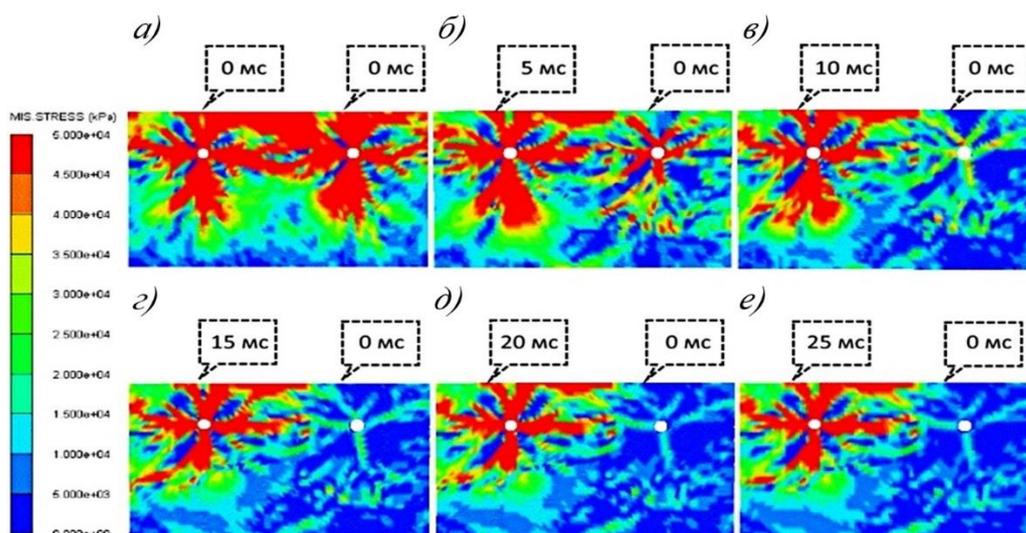


Рис. 4. Поле эквивалентных напряжений через 2 мс после иницирования второго заряда при интервалах замедления между скважинами, мс:
a — 0; *б* — 5; *в* — 10; *г* — 15; *д* — 20; *е* — 25

Fig. 4. Field of equivalent stresses 2 ms after the initiation of the second charge at intervals of slowdown among wells, ms: *a* — 0; *b* — 5; *v* — 10; *z* — 15; *d* — 20; *e* — 25

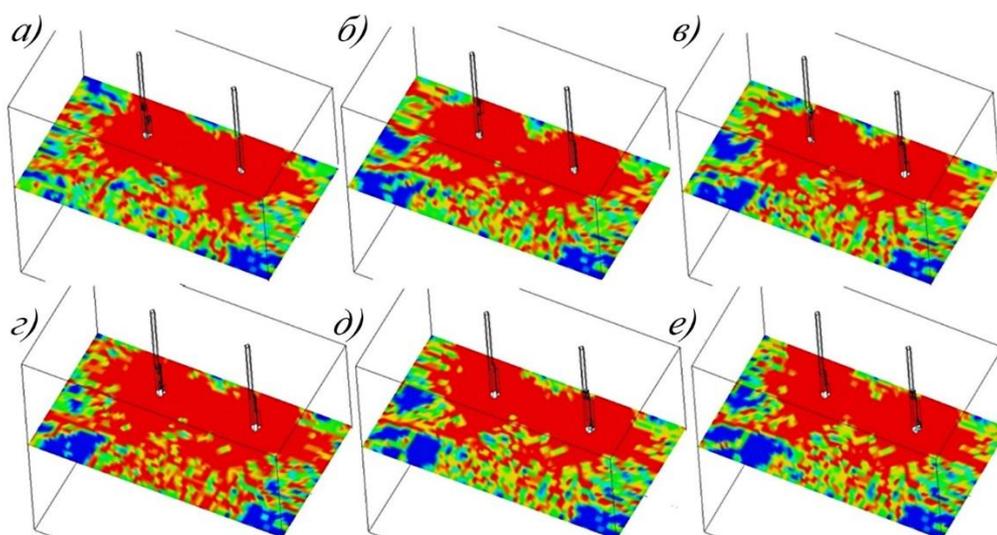


Рис. 5. Зоны разрушения при взрывании двух скважин с различными интервалами замедлений через 30 мс после иницирования второго заряда, мс:
a — 0; *б* — 5; *в* — 10; *г* — 15; *д* — 20; *е* — 25

Fig. 5. Failure areas after blasting two wells at different intervals of slowdown 30 ms after the initiation of the second charge, ms: *a* — 0; *b* — 5; *v* — 10; *z* — 15; *d* — 20; *e* — 25

2. Модели взрывания скважинных зарядов в двухмерной постановке.

Для учета влияния направления отбойки на нарушения массива за проектным контуром проведены серии вычислительных экспериментов в двухмерной постановке.

Геометрия моделей (рис. 6) представляет собой вмещающий массив с частью взрывного блока с одним и двумя рядами скважин диаметром 250 мм, расположенных по квадратной и шахматной сетке 5×6 м. Интервал замедления между скважинными зарядами в ряду — 67 мс, между рядами — 42 мс. В модели рассматриваются углы сопряжения отбиваемого слоя с вмещающим массивом 75°, 90° и 105°.

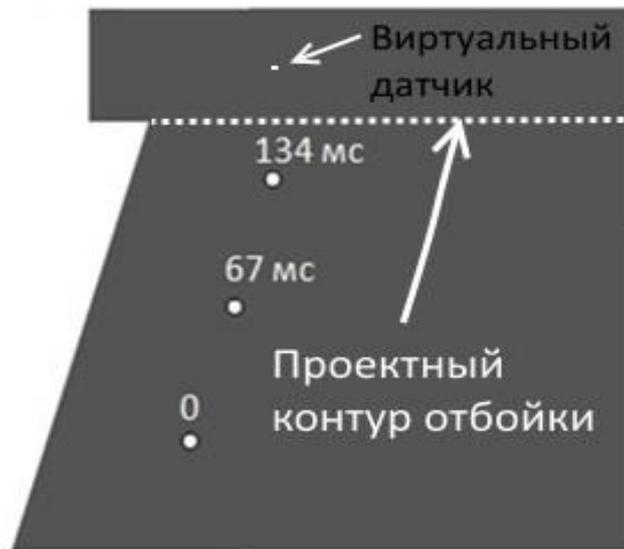


Рис. 6. Исходная геометрия модели с углом сопряжения отбиваемого слоя с вмещающим массивом 75°

Fig. 6. Primary geometry of the model with mate angle of chipped host mass layer 75°

Разработанные модели позволяют исследовать распределение поля радиальных и тангенциальных напряжений при различной ориентировке отбиваемого слоя относительно проектного контура отбойки (рис. 7) и определить наиболее сейсмобезопасные схемы взрывания скважинных зарядов при их разновременном инициировании.

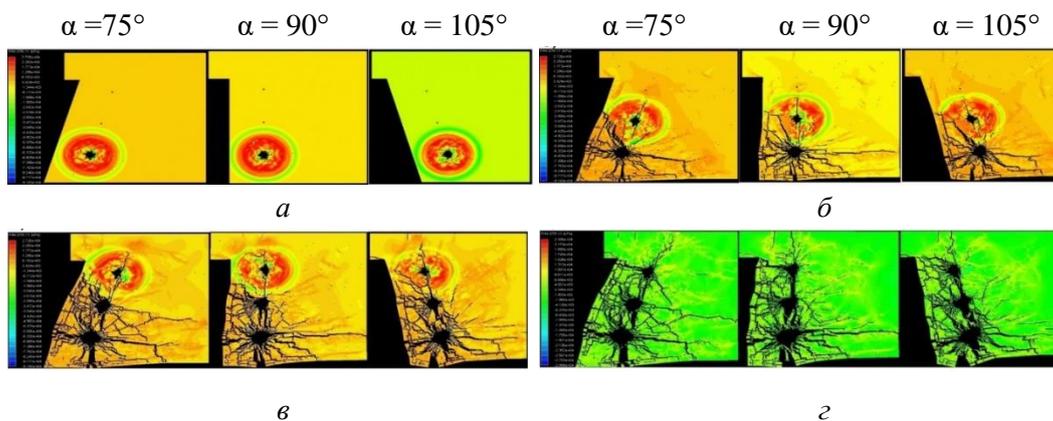


Рис. 7. Развитие трещин и распределение поля тангенциальных напряжений при различной ориентировке отбиваемого слоя относительно проектного контура отбойки: *а* — на момент времени 1 мс после взрыва первого заряда; *б* — на момент времени 1 мс после взрыва второго заряда; *в* — на момент времени 1 мс после взрыва третьего заряда; *г* — на момент времени 200 мс

Fig. 7. Cracking development and distribution of tangential stresses field at various orientation of the chipped layer relative to project blasting contour:

а — 1 ms after the first charge blast; *б* — 1 ms after the second charge blast; *в* — 1 ms after the third charge blast; *г* — at the time of 200 ms

По результатам проведенных вычислительных экспериментов установлено, что снижение интенсивности сейсмозрывного воздействия на массив горных пород за проектным контуром отбойки, при производстве массовых взрывов с использованием разновременного взрывания скважинных зарядов обеспечивается за счет выбора диагональной схемы взрывания с углом наклона диагоналей 105° – 120° по отношению к проектному контуру отбойки, при этом максимальное векторное смещение, скорость и ускорение снижаются в 1,7, 2,6 и 1,8 раза соответственно по сравнению с поперечными схемами взрывания.

3. Модели взрывания контурных скважин при постановке откосов уступов на конечный контур.

В связи с тем, что в настоящее время отсутствуют общепризнанные методики расчета воздействия на массив контурных зарядов, а экспериментально довольно трудно это воздействие оценить в ближней зоне, разработаны модели взрыва контурной щели — для сухих и обводненных скважин. В качестве контурных зарядов использовались линейные заряды сплошной конструкции ЗКВ-Б диаметром 43 мм, которые помещались в скважины диаметром 140 мм. Расстояние между скважинами 1,5 м (рис. 8, 9).

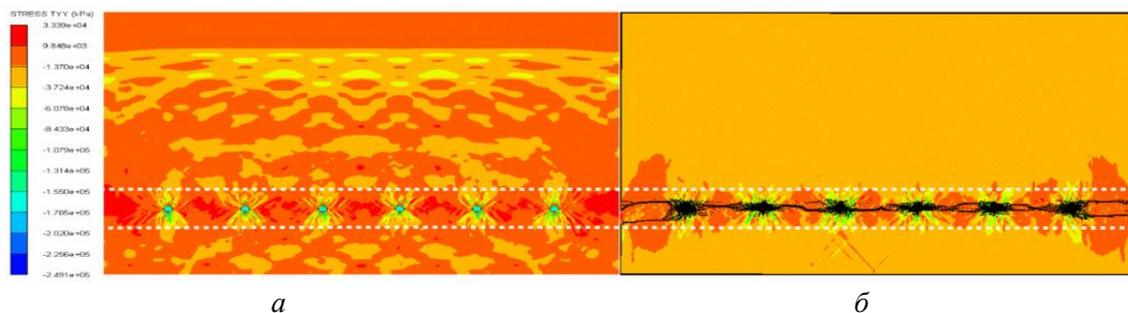


Рис. 8. Распределение поля напряжений и формирование отрезной щели на момент времени: *а* — 1 мс после взрыва; *б* — 30 мс после взрыва контурных зарядов с воздушным промежутком

Fig. 8. Distribution of stress field and cutting chink formation: *a* — 1 ms after the blast; *b* — 30 ms after the contour charges blast with air gapping

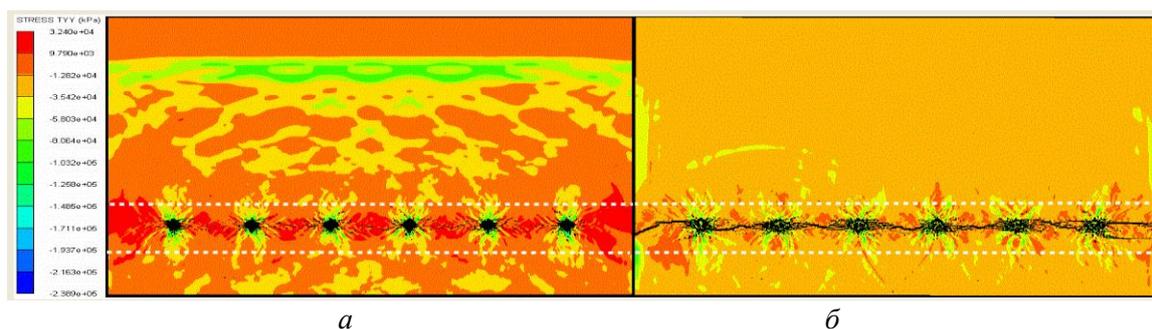


Рис. 9. Распределение поля напряжений и формирование отрезной щели на момент времени: *а* — 1 мс после взрыва; *б* — 30 мс после взрыва контурных зарядов с водяным промежутком

Fig. 9. Distribution of stress field and cutting chink formation: *a* — 1 ms after the blast; *b* — 30 ms after the contour charges blast with water gapping

Разработанные модели позволили установить, что при взрыве контурного ряда наличие воды в скважинах приводит к значительному изменению НДС приконтурного массива в ближней зоне, уровень действующих напряжений на расстоянии 1 м от контурного ряда в сторону массива в этом случае может превысить сопротивление пород на отрыв. При этом возможная зона нарушений сплошности массива пород за проектным контуром отбойки составляет 40–50 радиусов заряда. Полученные результаты необходимо учитывать при постановке бортов уступов в конечное положение.

С целью оценки влияния глубины отрезной щели на величину вызванных ею сейсмозрывных нагрузок разработана двухмерная модель взрывания контурной скважины. В геометрическом плане модель представляет собой часть породного массива с пятью уступами, на нижнем из которых происходит взрыв контурного заряда. Рассмотрено три варианта контурных скважин глубиной 15, 24 и 30 м. Распределение скоростей смещения точек массива при взрыве скважины глубиной 15 м представлено на рис. 10.

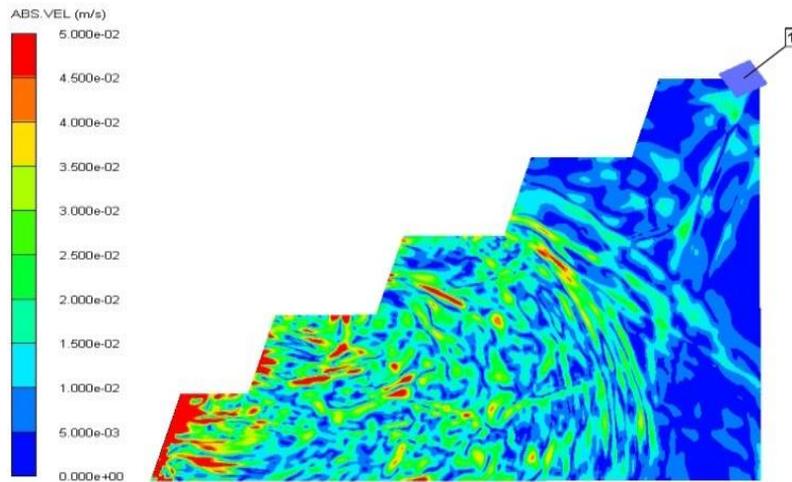


Рис. 10. Распределение скоростей смещения точек массива при взрыве отрезной щели глубиной 15 м
 Fig. 10. Distribution of rate of displacement of rock mass marks at the blast of cutting chink 15 m deep

Из результатов моделирования установлено, что при уменьшении глубины щели с 30 до 15 м происходит снижение скорости смещения в 1,7 раза, откуда следует, что переход к разделке отрезной щели на высоту одного 15-метрового уступа позволит существенно снизить сейсмическое действие взрыва.

4. Модель взрывания скважинных зарядов при веерном их расположении.

В настоящее время на горнорудных предприятиях, обрабатывающих запасы апатит-нефелиновых руд подземным способом, применяется система разработки очистных блоков с поэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. Отбойка массива при данной системе разработки ведется веерами глубоких скважин. При этом весьма актуальным является рассмотрение вопросов, связанных со снижением сейсмического эффекта массовых взрывов на массив пород за проектным контуром отбойки, а также исследование влияния взрывных работ на напряженное состояние и степень нарушенности вмещающего массива.

Для учета этого влияния разработана модель взрыва веера глубоких скважин в массиве пород (рис. 11). Основными параметрами модели являются: ЛНС — 2,8 м, диаметр скважинных зарядов — 102 мм. В качестве ВВ принято эмульсионное ВВ марки «Сабтек». Инициирование скважинных зарядов — обратное.

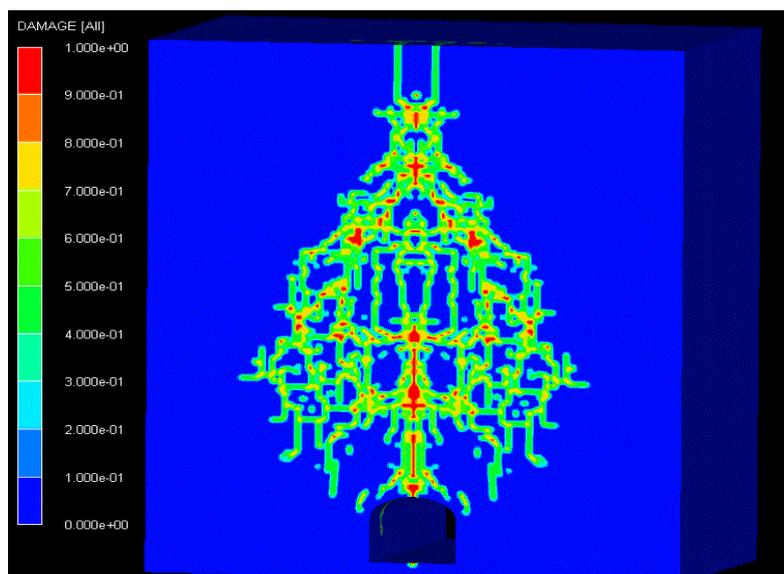


Рис. 11. Нарушенность массива со стороны свободной поверхности при взрыве скважин
 Fig. 11. Rock mass disturbance from the free surface at the blast of the wells

Разработанная модель позволяет произвести оценку поля напряжений (рис. 12), а также определить степень нарушения вмещающего массива (рис. 13).

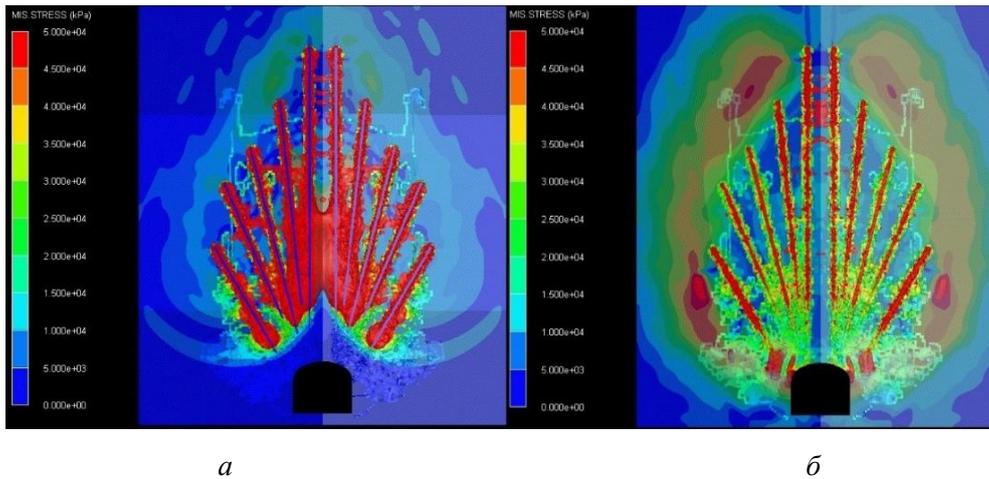


Рис. 12. Поле эквивалентных напряжений на момент времени 2 (а) и 5 (б) мс после инициирования зарядов
 Fig. 12. Field of equivalent stresses at the time of 2 (a) and 5 (b) ms after the charges initiation

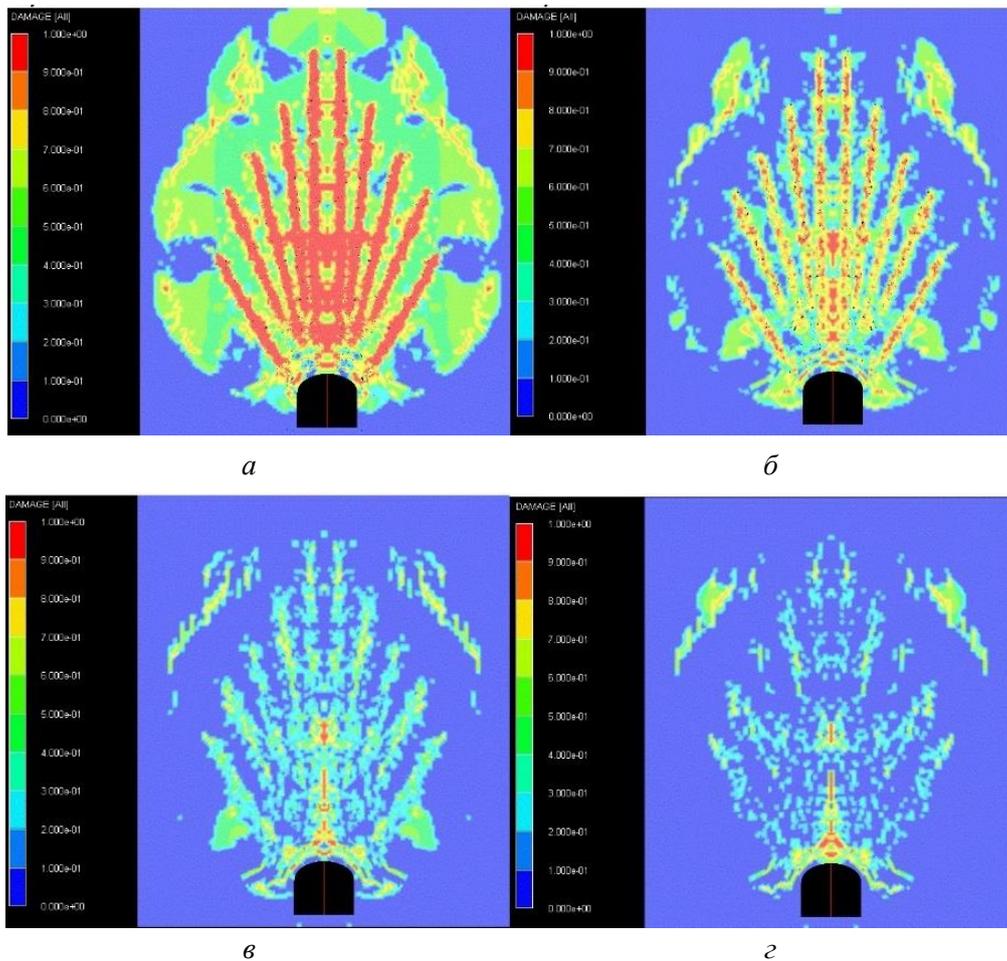


Рис. 13. Нарушения вмещающего массива на момент времени 10 мс в плоскости, находящейся на различном расстоянии от веера, м:

$a - 0,2; б - 0,4; в - 0,6; г - 0,8$

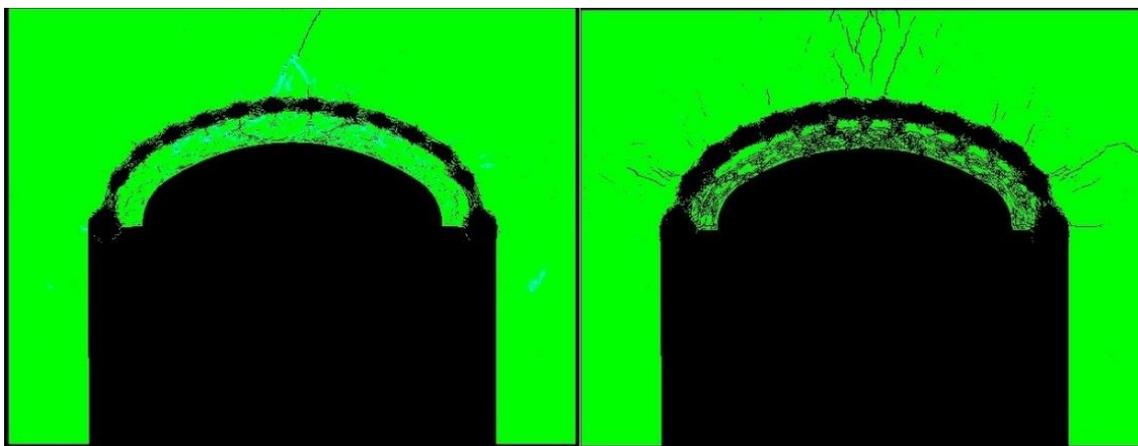
Fig. 13. Host rock mass failures at the time of 10 ms in the plane with various distance from the fan, m:

$a - 0,2; б - 0,4; в - 0,6; г - 0,8$

5. Модель взрывания контурных скважин при проведении горной выработки.

При проведении горных выработок весьма остро стоят проблемы сохранения целостности законтурного массива. В связи с этим при производстве взрывных работ при проходке выработок используют технологии шадящего контурного взрывания.

Одним из вариантов такой технологии является уменьшение количества ВВ в контурных шпурах путем заполнения их на половину сечения.



a

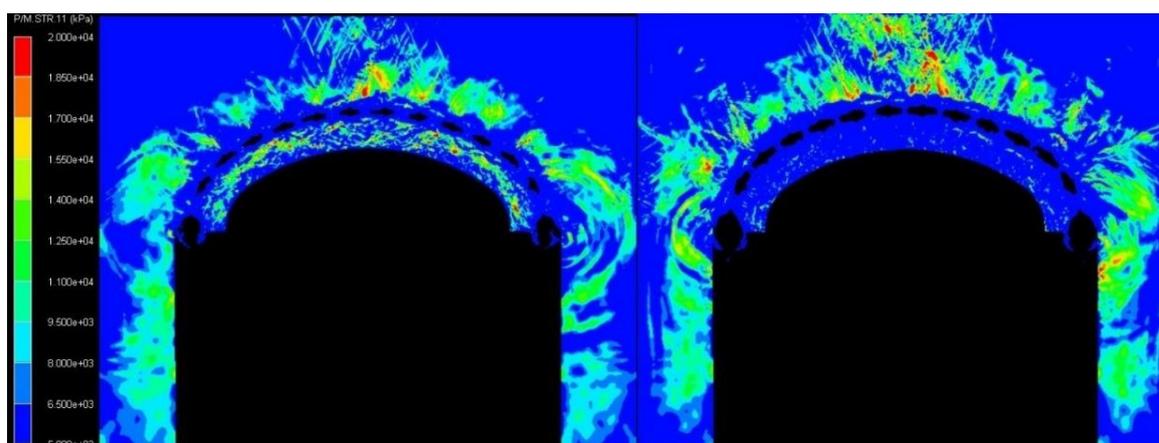
б

Рис. 14. Нарушения вмещающего массива при взрыве контурных шпуров:
a — шпуры заполнены на половину сечения; *б* — шпуры заполнены на полное сечение

Fig. 14. Host rock mass failures at the blast of contour boreholes:
a — boreholes filled to the half-section; *б* — boreholes filled to the full section

В модели рассматривается взрыв контурного ряда, расположенного по своду выработки. При этом рассмотрены варианты взрыва шпуров, заполненных ВВ на полное сечение и на половину. В модели сделано допущение о том, что на моделируемый момент времени уже произошла отбойка врубовых, отбойных шпуров и контурных шпуров по стенкам выработки.

Разработанная модель позволяет произвести оценку нарушения вмещающего массива (рис. 14), а также полей напряжений (рис. 15) в зависимости от количества ВВ в шпурах.



a

б

Рис. 15. Поле растягивающих напряжений при взрыве контурных шпуров:
a — шпуры заполнены на половину сечения, *б* — шпуры заполнены на полное сечение

Fig. 15. Tensile stress field at the blast of contour boreholes:
a — boreholes filled to the half-section; *б* — boreholes filled to the full section

Заключение

Произведена адаптация программного продукта Ansys Autodyn к решению задач по разрушению горных пород взрывом применительно к рудникам и карьерам Кольского п-ова с обоснованием наиболее приемлемых моделей прочности, и разработаны:

- модель взрывания смежных скважинных зарядов в объемной постановке при одно- и разновременном их инициировании;
- модели взрывания скважинных зарядов в двухмерной постановке;
- модели взрывания контурных скважин при постановке откосов уступов на конечный контур;
- модели взрывания скважинных зарядов при веерном их расположении;
- модели взрывания контурных скважин при проведении горной выработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бате К.-Ю. Методы конечных элементов. М.: Физматлит, 2010. 1024 с. 2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 543 с. 3. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 428 с. 4. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с. 5. Особенности сейсмического действия взрыва отрезной щели на законтурный массив и методы его снижения в условиях рудника «Железный» Ковдорского ГОКа / С. А. Козырев [и др.] // Взрывное дело. 2017. № 118/75. С. 212–226. 6. Numerical and physical modeling of geofoam barriers as protection against effects of surface blast on underground tunnels / A. De [et al.] // Geotextiles and Geomembranes. 2016. Vol. 44. P. 1–12. 7. Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses / X. F. Deng [et al.] // Tunneling and Underground Space Technology. 2014. Vol. 43. P. 88–100. 8. Experimental and numerical study of the fragmentation of expanding warhead casings by using different numerical codes and solution technics / J. F. Moxnes [et al.] // Defence Technology. 2014. Vol. 10. P. 161–176. 9. Ugrcic M. Numerical simulation of the fragmentation process of high explosive projectiles // Scientific Technical Review. 2013. Vol. 63, No. 2. P. 47–57. 10. Determination of detonation products equation of state from cylinder test: analytical model and numerical analysis / P. M. Elek [et al.] // Thermal Science. 2015. Vol 9, No. 1. P. 35–48. 11. Бургер И. А. Сопrotивление материалов: учеб. пособие. М.: Наука, 1986. 560 с. 12. Riedel W. Beton unter dynamischenlasten, Meso- und Makromechanische Modelle und Ihre Parameter. 2000. PhD thesis, EMI-Bericht 6/00. 13. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 / W. Riedel [et al.] // Numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes // Proceeding of the 9th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. Berlin, 1999. P. 315–322.

Сведения об авторах

Козырев Сергей Александрович — доктор технических наук, главный научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

Камянский Виктор Николаевич — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: kamyanski@goi.kolasc.net.ru

Author Affiliation

Sergey A. Kozyrev — Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

Victor N. Kamyanskiy — Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: kamyanski@goi.kolasc.net.ru

Библиографическое описание статьи

Козырев, С. А. Разработка численных моделей взрыва скважинных зарядов в массиве горных пород / С. А. Козырев, В. Н. Камянский // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 34–44.

Reference

Kozyrev Sergej A., Kamyanskiy Victor N. Development of Numerical Models of Borehole Charges Blasting in Rock Massif. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 34–44. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.45-53

УДК 622.838:626/627(470.21)

МНОГОУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ*

А. И. Калашник, Д. В. Запорожец, Н. А. Калашник
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

Рассмотрены методические подходы к организации мониторинга гидротехнических сооружений предприятий Мурманской обл. с привлечением современных инновационных методов. Дано обоснование структуры многоуровневой системы мониторинга и приведены примеры ее реализации на основных горнодобывающих предприятиях региона.

Ключевые слова:

гидротехнические сооружения, мониторинг, многоуровневые исследования, промышленная и экологическая безопасность.

MULTILEVEL MONITORING SYSTEM OF HYDRAULIC FACILITIES: THE CASE STUDY OF ENTERPRISES OF THE MURMANSK REGION

Anatoly I. Kalashnik, Dmitry V. Zaporozhets, Nadezhda A. Kalashnik
Mining Institute of KSC RAS, Apatity

Abstract

Methodical approaches to the organization of monitoring of hydraulic structures of enterprises of the Murmansk region with the involvement of modern innovative methods are considered. The structure of the multilevel monitoring system is justified and examples of its implementation in the main mining enterprises of the region are given.

Keywords:

hydraulic facilities, monitoring, multilevel studies, industrial and environmental safety.

Введение

Согласно СНиП33-01-2003 [1], гидротехнические сооружения (ГТС) — это сооружения, подвергающиеся воздействию водной среды и предназначенные для использования и охраны водных ресурсов, предотвращения вредного воздействия вод, в том числе загрязненных жидкими отходами. В законодательных и нормативных документах [1, 2] сказано, что ГТС включают в себя: плотины, здания гидроэлектростанций, водосбросные, водоспускные и водовыпускные сооружения, туннели, каналы, насосные станции, судоходные шлюзы, судоподъемники; сооружения, предназначенные для защиты от наводнений и разрушений берегов водохранилищ, берегов и дна русел рек; сооружения (дамбы), ограждающие золошлакоотвалы, шламохранилища и хранилища жидких отходов промышленных и сельскохозяйственных организаций; устройства от размывов на каналах, сооружения морских нефтегазопромыслов и т. п.

ГТС Мурманской обл. В Мурманской обл. имеется значительное число ГТС различного назначения, относящиеся прежде всего к горнопромышленным и гидроэнергетическим предприятиям (рис. 1).

Основные комплексы ГТС Мурманской обл. представляют собой насыпные грунтовые сооружения добывающей промышленности (горнорудной, строительной, нефтегазовой), энергетики (комплексы ГЭС, АЭС и ТЭЦ) и строительства (в основном промышленного, гражданского

* Исследования выполнялись при поддержке академика РАН Н. Н. Мельникова.

и дорожного), а также комплексы по складированию отходов горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, жизнедеятельности и сельского хозяйства, энергетики. Кроме этого, в области имеются специальные ГТС, предназначенные для регулирования и управления водными ресурсами в целях жизнехозяйственного, промышленного и водотранспортного обеспечения, а также ГТС-защитные сооружения от неблагоприятных природных и природно-техногенных воздействий [3]. Авторами на основе выполненного анализа их состояния и назначения и в целях систематизации все разновидности ГТС Мурманской обл. сведены в классификационную схему по видам предприятий (добывающая промышленность, энергетика, строительство), складирования отходов и регулирования и управления водными ресурсами (рис. 2) [4].

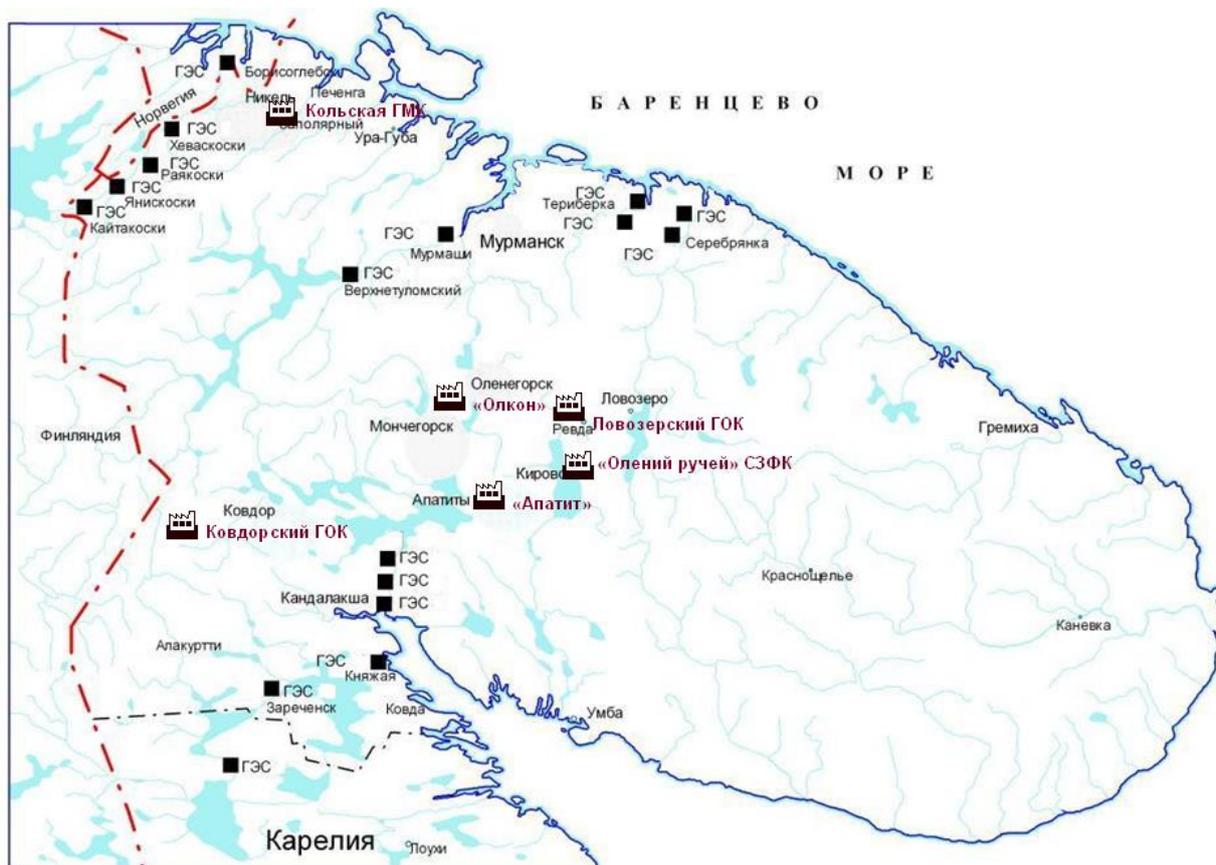


Рис. 1. Схема расположения ГТС горнопромышленных и гидроэнергетических предприятий Мурманской обл.

Fig. 1. Murmansk Oblast mining and hydropower enterprises hydraulic facilities location scheme

Большинство ГТС Мурманской обл. являются потенциально опасными объектами I и II класса, эксплуатация которых должна осуществляться в строгом соответствии с требованиями промышленной безопасности, регламентируемыми Федеральным законом «О безопасности гидротехнических сооружений» [2] и Строительными нормами и правилами РФ «Гидротехнические сооружения. Основные положения» [1]. Нарушение фильтрации и функциональности, потеря устойчивости таких ГТС может привести к аварийной ситуации и значительному социально-экономическому ущербу населению, гражданским и промышленным зданиям, дорогам, инженерно-техническим коммуникациям и т. п., а также к финансовым потерям (недополученная прибыль вследствие остановки ГЭС или горного предприятия), дополнительным затратам (ремонтно-восстановительные работы плотин, дамб, пульпопроводов, дорог, линий электропередач, пьезометрических станций, устройств и механизмов и др.; ликвидация последствий аварии; восстановление окружающих природных систем), включая штрафы за загрязнение окружающей среды и экологический ущерб.

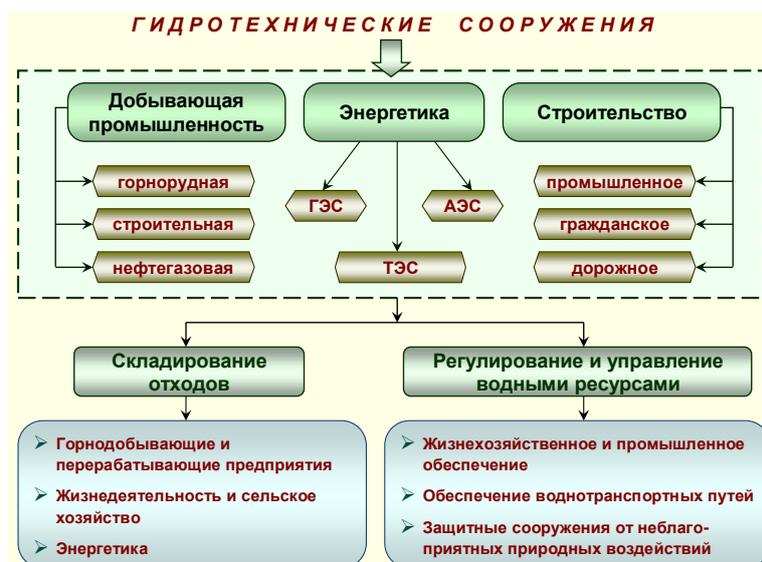


Рис. 2. Классификация гидротехнических сооружений по видам предприятий Мурманской обл.

Fig. 2. Classification scheme of hydraulic facilities according to types of Murmansk Oblast enterprises

В Мурманской обл. развита горная промышленность. Вследствие интенсивного недропользования на протяжении более 80 лет на Кольском п-ове накоплено свыше 8 млрд т горнопромышленных отходов, что привело к значительному изменению рельефа региона: появились техногенные горы из отвалов горных пород высотой до 60 м и длиной в несколько километров; созданы хвостохранилища площадью в несколько тысяч гектаров и высотой до 50 м; в окрестностях горнодобывающих и перерабатывающих производств произошла существенная деградация окружающей природной среды, изменился гидрогеологический режим. В настоящее время эти «преобразования» продолжают — ежегодный прирост объемов отходов составляет свыше 20 млн т — и во все большей степени обуславливают необходимость и актуальность проблемы контроля их состояния и прогнозирования тенденций изменения окружающей среды. Особого внимания требуют хвостохранилища горнопромышленных предприятий.

Обоснование мониторинга

Для промышленной безопасности гидротехнических сооружений промышленных предприятий необходимо перспективное и стратегическое решение задач обеспечения их механической устойчивости и функциональности при природных и техногенных воздействиях [4, 5]. Природное воздействие на ГТС подразумевает действие гравитационных и гидравлических сил, эффекты от современных движений земной коры, процессов по активным геологическим разломам, природных землетрясений, подземных, поверхностных и паводковых вод и др. Техногенное воздействие обусловлено технологическими процессами, взрывной отбойкой пород, крупномасштабным перемещением породных масс, режимами заполнения накопителей жидких горнопромышленных отходов, сбросов промышленных вод и др. Совместное интегрированное воздействие приводит к изменению механической устойчивости и функциональности ГТС промышленного объекта, а также сопряженной с ним геологической среды.

Обязательным условием обеспечения безопасности ГТС промышленного объекта является комплексный многоуровневый геомониторинг, организованный на различных масштабных и измерительных уровнях, проведение которого позволяет выявить на ранней стадии развитие опасных фильтрационно-деформационных процессов [5]. Важную роль при этом играют экспертная оценка механического состояния и функциональности ГТС, а также результаты прогнозирования на основе создания компьютерных моделей и моделирования различных вариантов развития ситуации. В комплексе с использованием баз данных и знаний становится возможным своевременно принять управленческое решение по предотвращению развития чрезвычайной и аварийной ситуации.

Исследования Горного института КНЦ РАН

Горным институтом КНЦ РАН комплексные исследования гидротехнических сооружений хвостохранилищ горнодобывающих предприятий системно были начаты в 2010 г. при строительстве Северо-Западной фосфорной компанией (СЗФК) нового комбината «Олений ручей» для разработки одноименного месторождения апатитовых руд. В начале с применением инновационных георадарных комплексов были проведены подповерхностные исследования площадки под строительство хвостохранилища и поэтапной отсыпки ограждающих дамб (верховой, низовой и дамбы вторичного отстойника). Затем в целях контроля состояния и эффективности работы ГТС хвостохранилища при выводе на рабочий режим был заложен наблюдательный полигон, включающий в себя три ветви контрольно-наблюдательных реперов, гидрогеологических скважин и пьезометров и постоянных георадарных профилей.

Мониторинговые наблюдения выполнялись режимно (ежемесячно) и были направлены на решение следующих задач:

- визуальные осмотры и фотофиксация проблемных участков;
- определение планово-высотного положения контрольно-наблюдательных реперов средствами наземной (полигонометрия и нивелирование) и спутниковой (GPS-определения в режиме «статика») геодезии;
- контроль положения депрессионной поверхности, фильтрующейся в телах ограждающих дамб воды, точечными гидрологическими (пьезометрическими) измерениями и площадным георадарным зондированием;
- контроль механического состояния внутренней структуры ограждающих дамб по данным георадарного зондирования;
- контроль заполнения емкости хвостохранилища.

Для оценки устойчивости ограждающих дамб и прогноза тенденций изменения механического и фильтрационного состояния ГТС хвостохранилища были применены традиционные инженерно-аналитические расчеты, а также была создана и исследована методами компьютерного моделирования 3D-модель.

В 2012 г. Горным институтом КНЦ РАН были начаты системные мониторинговые исследования на ГТС хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК». Особенностью этих наблюдений было то, что основное хвостохранилище было разделено на два поля (поле № 1 и поле № 2), при этом поле № 2 заполнялось отходами с обогатительной фабрики в штатном режиме, а поле № 1 было вовлечено в повторную переработку с ковшово-экскаваторной выемкой. Вследствие этого дамба № 1 хвостохранилища, с одной стороны, являлась ограждающей для поля № 2, с другой — бортом с рабочими уступами карьера в поле № 1 [6]. Был создан также наблюдательный полигон и выполнены режимные мониторинговые наблюдения, идентичные проводимым на ГОКе «Олений ручей». В последнее время в сложившуюся систему были дополнительно интегрированы аэрофотосъемка и данные спутниковых оптических и радарных снимков.

На ГТС АО «Кольская ГМК» мониторинговые наблюдения Горным институтом КНЦ РАН проводятся с 2014 г. Гидротехническое сооружение, представляющее собой хвостохранилище, огражденное Южной и Северной дамбами протяженностью около 4 км каждая. Хвостохранилище обогатительной фабрики ОАО «Кольская ГМК» овражного типа, по способу заполнения — намывное, предназначено для непрерывного складирования хвостов обогащения медно-никелевых руд в емкость хвостохранилища и обеспечения фабрики чистой оборотной водой по замкнутому циклу оборотного водоснабжения для технологических нужд. Ограждающие дамбы хвостохранилища — Северная и Южная — относятся к I классу капитальности [1]. На ГТС хвостохранилища ежегодно проводятся мониторинговые наблюдения, включающие в себя: высокоточные режимные геодезические измерения по контрольным реперам; исполнительную съемку откосов по створам дамб; топографическую съемку текущей ситуации дамб; техническое нивелирование гребней дамб обвалования и намывных дамб; измерения длин намывных пляжей и уровня воды; промер глубин отстойного пляжа с измерением толщины донных отложений.

Горным институтом КНЦ РАН также был решен ряд мониторинговых задач для АО «Апатит» и АО «ОЛКОН». На гидротехнических сооружениях (плотинах) отстойников Восточного рудника АО «Апатит» были выполнены режимные мониторинговые геофизические исследования, в результате которых была получена детальная информация об их структуре и состоянии. В процессе сравнительного анализа были выделены проблемные участки в теле ГТС, за развитием которых впоследствии велось организованное наблюдение. Для повышения качества инструментального мониторинга деформационных процессов в теле ГТС были заложены контрольные реперы/марки и организован геодезический полигон.

Особенностью мониторинговых работ на хвостохранилище ГОК АО «ОЛКОН» было определение притока и оттока воды в бассейне ГТС, составление водного баланса хвостохранилища и выявление его значимости. Для этих целей в зимний период были выполнены два цикла измерения глубины воды при помощи георадарного зондирования с поверхности льда. В отстойнике хвостохранилища было выполнено профилирование по сетке с шагом 150×150 с жесткой привязкой в узловых точках путем бурения лунок и измерения глубины воды с помощью шеста. Была выполнена топографическая съемка по периметру ледового покрова, по результатам камеральной обработки георадарных данных произведен расчет объемов воды в хвостохранилище. В летний период осуществлено несколько замеров глубины воды в отстойнике хвостохранилища, выполнена съемка уреза воды, а также на проблемном участке дамбы была произведена оценка противодиффузионной устойчивости ГТС с помощью флуоресцирующего раствора.

Многоуровневая система мониторинга

На основе выполняемых работ в Горном институте КНЦ РАН была создана многоуровневая система геомониторинга ГТС промышленных объектов, прежде всего для горнодобывающих предприятий, базирующаяся на комплексировании разномасштабных междисциплинарных натурных наблюдений и компьютерном моделировании [5]. Как было показано в работе [5], в созданной системе мониторинга (дополнительно к маркшейдерско-геодезическим наблюдениям) использовались инновационные геофизические методы: электромагнитное (георадарное) подповерхностное и поверхностное сканирование, микросейсмомография, а также цифровая и интерферометрическая обработки радарных и оптических космоснимков. Чтобы спрогнозировать изменения состояния контролируемых объектов, создавались гидрогеомеханические 3D-модели, которые исследовались с применением специализированных программных комплексов Plaxis. В итоге сформировалась концептуальная структура многоуровневой системы геомониторинга ГТС предприятий, в которой выделяется пять уровней [4, 5] (рис. 3): спутниковый (удаленный надповерхностный), воздушный (надповерхностный), наземный (поверхностный), подповерхностный, компьютерный (мультиповерхностный) (показаны на рис. 3 сверху вниз). Названия уровней авторами соотнесены с дневной поверхностью контролируемых гидротехнических сооружений и сопряженной с ними геологической среды; при этом исходя из возможностей в компьютерном моделировании многовариантного изменения геометрии и размеров данный уровень получил название «мультиповерхностный».

Мониторинговые наблюдения на каждом уровне включают комплексы методов и средств, их основной набор детально описан в работе [5], в которой авторами в таблице перечислены необходимые для каждого уровня мониторинга виды работ, дано их краткое описание, а также целесообразная периодичность их проведения.

Спутниковый (удаленный надповерхностный) уровень предусматривает GPS-определение по технологии «статика» (возможно, и «полустатика»), а также цифровую и интерферометрическую обработку и анализ радарных и оптических космоснимков. При этом периодичность работ может быть приемлемой от 1 до 3–4 раз в год. В некоторых случаях, обусловленных большей детальностью и частотой, данные радарных снимков могут быть использованы с периодичностью один раз в 3–7 дней [7–12].

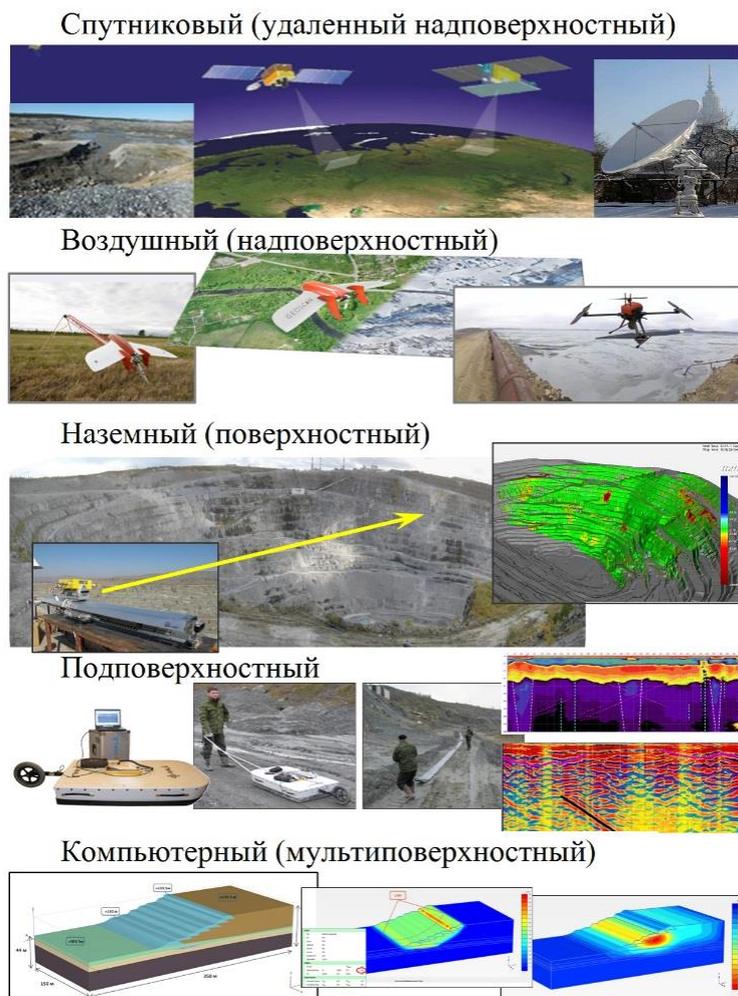


Рис. 3. Концептуальная структура многоуровневой системы геомониторинга ГТС предприятий

Fig. 3. Enterprises hydraulic facilities geomonitoring multilevel system conceptual framework

Воздушный (надповерхностный) уровень в основном обеспечивается аэрофотосъемкой с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [5]. Могут применяться БПЛА как самолетного, так и вертолетного типа, с автоматическим проведением аэрофотосъемочных работ один раз в полгода и последующей автоматизированной обработкой данных аэрофотосъемки с помощью фотограмметрического программного обеспечения.

Наземный (поверхностный) уровень включает в себя в основном традиционные виды работ мониторинга: визуальные наблюдения, фотофиксация, маркшейдерско-геодезические плановые и высотные измерения, лазерное сканирование, а также развивающееся в последнее время радарное сканирование наклонных и субвертикальных склонов (откосов), выполняемое практически в непрерывном режиме [5]. Минимально целесообразная периодичность выполнения для каждого вида этих работ приведена в таблице и может регулироваться в зависимости от степени ответственности контролируемого объекта.

Подповерхностный уровень включает виды работ, направленные в основном на идентификацию и контроль фильтрационно-деформационных процессов, происходящих в ГТС. Наряду с режимными ежемесячными гидрологическими (пьезометрическими) измерениями целесообразно с такой же периодичностью применение микросейсмотографии и георадарного подповерхностного зондирования, что позволяет не только детализировать положение депрессионной поверхности грунтовых вод, «верховодок» и других локально водонасыщенных зон, но и уточнить внутреннюю структуру контролируемого объекта.

Виды и периодичность выполнения работ многоуровневого геомониторинга ГТС предприятий
 Kind and frequency of multilevel enterprises hydraulic facilities geomonitoring performance

Уровни Level	Виды работ Kind of works	Периодичность выполнения Frequency
Спутниковый (удаленный надповерхностный) Satellite (remote, above- surface)	GPS-определения GPS measurements	Один раз в год Once a year
	Спутниковая оптическая съемка Satellite optical imaging	Один раз в квартал Once a quarter
	Спутниковая радарная съемка Satellite radar imaging	Три-четыре раза в квартал Three to four times a quarter
Воздушный (надповерхностный) Air (above-surface)	Аэрофотосъемка Aerial imaging	Один раз в полгода Once every six months
	Аэротепловая съемка Aerial thermal imaging	Один раз в полгода Once every six months
	Аэорадарная съемка Air radar imaging	Один раз в полгода Once every six months
Наземный (поверхностный) Ground (surface)	Визуальные наблюдения Visual supervision	Один раз в месяц Once a month
	Фотофиксация Photofixing	Один раз в квартал Once a quarter
	Геодезические плановые и высотные измерения Geodetic horizontal and vertical measurements	Один раз в полгода Once every six months
	Лазерное сканирование Laser scanning	Один раз в год Once a year
	Радарное сканирование Radar scanning	Постоянно Regular
Подповерхностный Subsurface	Гидрологические (пьезометрические) измерения Hydrological (piezometric) measurements	Один раз в месяц Once a month
	Сейсмотомография Seismotomography	Один раз в месяц Once a month
	Георадарное зондирование Georadar sensing	Один раз в месяц Once a month
Компьютерный (мультиповерхностный) Computer (multi-surface)	Геомеханическое моделирование Geomechanical modeling	Один раз в квартал Once a quarter
	Гидрогеомеханическое моделирование Hydro-geomechanical modeling	Один раз в квартал Once a quarter
	Сценарное и ситуационное моделирование Scenario and situational modeling	Один раз в месяц Once a month

Компьютерный (мультиповерхностный) уровень включает в себя создание 2D- и 3D-моделей контролируемого объекта, которые должны корректироваться с учетом данных инструментальных геомеханических, геодезических, георадарных и гидрологических измерений не реже одного раза в год [6]. Модели исследуются в целях оценки: механического состояния (геомеханическое моделирование), изменения гидрогеологических условий (гидрогеомеханическое моделирование), рисков потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов (сценарное и ситуационное моделирование).

Таким образом, целеполагание созданной системы комплексного многоуровневого геомониторинга гидротехнических сооружений предприятий направлено на то, чтобы применить комплекс междисциплинарных методов, инструментов и технологий, которые, наряду с решением сугубо практических задач, позволяли бы получать новые знания и использовать их с применением современных информационных технологий для генерирования знаний более высокого уровня.

Заключение

На основе выполненных исследований разработана многоуровневая комплексная система мониторинга гидротехнических сооружений промышленных предприятий Мурманской обл., в основу которой положен принцип синхронизации междисциплинарных исследований, включающих в себя геодезические (наземные и GPS), гидрологические, геомеханические и геофизические измерения, а также подповерхностные, наземные, воздушные и спутниковые георадарные съемки. При проведении исследований использовались современные инновационные методы и средства и выполнялись режимные измерения на различных уровнях, соотнесенных с дневной поверхностью: подповерхностном (гидрологические (пьезометрические) измерения, георадарное зондирование, сейсмотомография); наземном (визуальные наблюдения, фотофиксация, геодезические измерения, лазерное и радарное сканирование); воздушном/ надповерхностным (оптическая, тепловая и радарная аэрофотосъемки с применением БПЛА); дистанционном/удаленном надповерхностном (GPS-геодезия, спутниковые оптические и радарные снимки); компьютерном/мультиповерхностным (геомеханическое, гидрогеомеханическое, сценарное и ситуационное моделирование). Натурные междисциплинарные многоуровневые исследования составляют основу мониторинга, в результате которого полученные данные постоянно дополняют и обновляют базы данных. Многоуровневый подход использован также в компьютерном, геомеханическом, гидрогеомеханическом и ситуационном моделировании ГТС хвостохранилищ. Предложены новые методы, позволяющие адаптировать стандартные подходы к целям комплексного мониторинга гидротехнических сооружений для минимизации рисков техногенных катастроф и экологических последствий горнодобывающей деятельности.

Исследования в рамках комплексного многоуровневого мониторинга гидротехнических сооружений реализованы применительно к основным горнодобывающим предприятиям Мурманской обл.: АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», ГОК «Олений ручей» АО «СЗФК». Отдельные задачи мониторинга решены применительно к ГТС АО «Апатит», ОЛЖОН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидротехнические сооружения. Основные положения: Строительные нормы и правила РФ. СНиП 33-01-2003. Ввод в действие с 01.01.2004. М.: Госстрой России, 2004. 30 с.
2. О безопасности гидротехнических сооружений: федер. закон от 21 июня 1997 г. № 117-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/ (дата обращения: 08.01.2019).
3. Комитет по обеспечению безопасности населения Мурманской обл.: офиц. сайт. URL: http://safety.gov-murman.ru/opencms/export/sites/safety/komiss/ch_s/docs/kchs_2 (дата обращения: 08.01.2019).
4. Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря / Н. Н. Мельников [и др.] // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1. С. 13–20.
5. Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов / Н. Н. Мельников [и др.] // ФТПРПИ. 2018. № 4. С. 1–8.
6. Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа / А. А. Данилкин [и др.] // ГИАБ. 2014. № 7. С. 344–352.
7. Ferretti A. Satellite InSAR Data: reservoir monitoring from space, EAGE Publications bv, 2014. 160 p.
8. InSAR data for monitoring land subsidence: time to think big / A. Ferretti [et al.] // Proc. International Association of Hydrological Sciences (IAHS). 2015. P. 331–334.
9. Operational monitoring of mines by COSMO-SkyMed PSP SAR interferometry / M. Costantini [et al.] // European Space Agency. (Special Publication). 2016. ESA SP-740.
10. Совершенствование удаленного автоматизированного контроля откосных сооружений на горных предприятиях / В. В. Мосейкин [и др.] // Горн. журн. 2017. № 12. С. 82–86.
11. Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии / Ж. Т. Кожаев [и др.] // Горн. журн. 2017. № 2. С. 39–44.
12. Hartwig M. E. Detection of mine slope motions in Brazil as revealed by satellite radar interferograms // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2016. Vol. 75 (2). Iss. 2. P. 605–621.

Сведения об авторах

Калашник Анатолий Ильич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

Запорожец Дмитрий Владимирович — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: zaporojec@goi.kolasc.net.ru

Калашник Надежда Анатольевна — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: nadezhda-kalashnik28@rambler.ru

Author Affiliation

Anatoly I. Kalashnik — PhD (Engineering), Leading Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

Dmitry V. Zaporozhets — Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: zaporojec@goi.kolasc.net.ru

Nadezhda A. Kalashnik — Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: nadezhda-kalashnik28@rambler.ru

Библиографическое описание статьи

Калашник, А. И. Многоуровневая система мониторинга гидротехнических сооружений горнопромышленных предприятий и гидроэнергетики Мурманской области / *А. И. Калашник, Д. В. Запорожец, Н. А. Калашник* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 45–53.

Reference

Kalashnik Anatoly I., Zaporozhets Dmitry V., Kalashnik Nadezhda A. Multilevel Monitoring System of Hydraulic Facilities: the Case Study of Enterprises of the Murmansk Region. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 45–53. (In Russ.).

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ С СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩИМИ МИНЕРАЛАМИ В СОСТАВЕ ГЕМАТИТ-МАГНЕТИТОВЫХ КВАРЦИТОВ ОЛЕНЕГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

С. А. Козырев, Е. А. Власова

ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

В работе приведены исследования химической совместимости взрывчатых веществ (ВВ) собственного изготовления с породами Оленегорского месторождения и оценки химической стабильности зарядов ВВ при их продолжительном нахождении в шпурах и скважинах подземного рудника АО «Олкон».

Ключевые слова:

взрывчатые вещества, химическая совместимость, сульфидные породы, безопасность.

INVESTIGATION OF THE CHEMICAL INTERACTION OF AMMONIUM NITRATE WITH SULFIDE-CONTAINING MINERALS IN THE COMPOSITION OF HEMATITE-MAGNETITE QUARTZITE OF THE OLENEGORSK DEPOSIT

Sergey A. Kozyrev, Elena A. Vlasova

Mining Institute of KSC RAS, Apatity

Abstract

For sulfide ores with a sulfur content of 10–20 % and more, a tendency to spontaneous combustion is characteristic, which occurs as a result of oxidation with the release of heat in the ore, which has been mined for a long time. This paper presents studies of the chemical compatibility of in-house explosives with rocks from the Olenegorsk deposit and the assessment of chemical stability with prolonged explosive charges in the bore holes and wells of the underground mine of “Olkon”, JSC.

Keywords:

explosives, chemical compatibility, sulphide rocks, safety.



Введение

В 2017 г. на Сибайском подземном руднике ОАО «Учалинский горно-обогатительный комбинат» Уральской горно-металлургической компании при добыче медных и медно-цинковых руд впервые был зафиксирован случай гибели двух работников в результате возгорания сульфидной смеси [1]. Меры безопасности по предотвращению подобных ситуаций находятся в стадии разработки. По-прежнему основные нормативные документы — это «Инструкции...» 1981 и 1991 гг. [2, 3]. В 2017 г. Ростехнадзором было предписано выполнить научно-исследовательские работы по оценке взрыво- и пожароопасности пыли горных пород и руд, разработать мероприятия по предупреждению самопроизвольных возгораний и взрывов при ведении горных и взрывных работах в сульфидосодержащих рудах. Важной задачей при реализации этого предписания стало выполнение работ по оценке химической совместимости применяемых аммиачно-селитренных взрывчатых веществ с горными породами и внутрискважинными водами разрабатываемых месторождений.

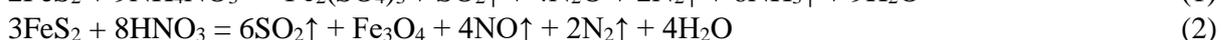
При использовании аммиачно-селитренных взрывчатых веществ в горных породах с сульфидной минерализацией периодически наблюдались аномальные явления, которые свидетельствуют о возникновении в скважине реакций между компонентами заряда и горной

массой. В связи с этим применение аммиачно-селитренных ВВ для разработки сульфидных руд ограничено. Ранее исследованиями по этой проблеме [4–6] установлено, что возникновение аномальных явлений может быть следствием реакций между серосодержащими минералами и аммиачной селитрой, протекающих в сильноокислой среде. Выполненные исследования касались в основном применения горячельющихся ВВ типа «акватол», которые ранее применялись в горнодобывающей промышленности России, в том числе и на карьерах Оленегорского месторождения.

В связи с широким применением аммиачно-селитренных ВВ в последнее время были проведены работы по определению их термической стабильности в сульфидных рудах [7, 8]. Авторами детально рассмотрены возможные взаимодействия сульфидсодержащих минералов с основным компонентом промышленных взрывчатых веществ — аммиачной селитрой. Утверждается, что при длительном контакте селитры с рудничными водами, которые имеют кислую реакцию, образуется азотная кислота (HNO_3), вступающая в реакцию с сульфидсодержащими породами. Образующийся оксид азота (IV), в свою очередь, окисляет аммиачную селитру, а выделяющееся тепло разогревает всю систему:



Основную опасность представляет пирит (FeS_2), который присутствует практически во всех сульфидных породах. Он способен проявлять активные восстановительные свойства и легко окисляется при контакте с аммиачной селитрой и кислотами с выделением значительного количества тепла:



Пассивации поверхности пирита в кислой среде не происходит из-за обратимости процесса, она возможна лишь в нейтральных и слабощелочных средах, когда их поверхность покрыта не только серой, но и оксидами железа (III) [9].

Как и большинство сульфидных минералов, пирит склонен к окислению в воздушной среде в присутствии воды [10]. Один из процессов, протекающих при контакте пирита с воздухом, может быть представлен следующим уравнением:



Реакция (3) реализуется на поверхности минерала, следовательно, процесс значительно интенсифицируется при измельчении пирита как за счет увеличения поверхности контакта с окислителем, так и за счет разогрева материала при измельчении.

Авторы всех исследований пришли к выводу, что в результате реакций взаимодействия выделяется тепло, которого достаточно для образования локальных точек разогрева и инициирования разложения системы по механизму теплового взрыва. Указывается, что интенсивность взаимодействия может зависеть от ряда факторов: типа сульфидных минералов, температуры, степени измельчения, кислотности системы и др.

Породы и руды Оленегорского месторождения железистых кварцитов вмещают второстепенные минералы — пирит и пирротин до 0,3 %. Ранее исследований, посвященных изучению склонности руд и пород месторождения к самовозгоранию, на месторождении не проводилось.

Результаты и их обсуждение

Для проведения исследований от геологической службы Оленегорского подземного рудника (ОПР) были получены образцы руды и шламов шарошечного бурения. В работе использовали селитру аммиачную пористую модифицированную по ТУ 2143-029-00203795-2005 производства ОХК «Уралхим». Для изучения основных параметров взаимодействия аммиачной селитры

с серосодержащими минералами был взят образец руды с массовой долей пирита более 80 %. Образец не является типичным для данного месторождения, он использовался для сравнения.

Все полученные образцы предварительно высушивались при температуре 105 ± 5 °С в течение 4–6 ч. При сушке образцов выделения сернистого газа не зафиксировано. После образцы руды измельчали в металлической ступке. Помольный продукт просеивали через сито с отверстиями 100 мкм. Фракцию –100 мкм использовали для исследований, а фракцию +100 мкм подвергали дальнейшему измельчению. Для подготовки образцов на химический анализ фракция –100 мкм дополнительно истиралась в лабораторном измельчителе. Для изучения взаимодействия шламов, руды и пирита с аммиачной селитрой отдельно были приготовлены образцы с размерами частиц фракций: –0,1+0,063; –0,063+0,02; –0,02+0 мм. Эти фракции готовили вручную путем рассева измельченной пробы на прецизионных никелевых микроситах с квадратной формой ячеек, который производили на лабораторном ротапе.

В образцах определяли содержание железа общего и серы общей. Известно, что сульфидные руды с содержанием серы менее 35 % считаются невзрывоопасными [3]. По результатам анализа, содержание серы в образцах руды и шламов бурения находится в значительно меньшем количестве — от 0,002 до 0,061 %. Следовательно, железистые кварциты Оленегорского месторождения — невзрывоопасные.

Кислотность образцов определяли путем измерения рН водных растворов и вытяжек с использованием иономера HANNA Instruments HI 2210 pH Meter. Для оценки влияния продолжительности контакта шлама с водой в присутствии кислорода воздуха на кислотность жидкой фазы образцы суспензий выдерживали в открытых стаканах в течение 1 месяца с периодическим контролем рН.

Измерения показали, что по активности исследуемые образцы не различаются. При взаимодействии на воздухе с водой все образцы не характеризуются тенденцией к образованию кислых продуктов. При их соприкосновении с водой образуются в большей или меньшей степени слабощелочные растворы. Эти результаты согласуются с данными о рН рудничных вод ОПР. По данным измерений, рН находится в диапазоне от 7,64 до 8,13, т. е. воды имеют щелочную реакцию. Руды и породы в контуре подземной отработки практически не содержат примесей (или содержат их в малом количестве), способных при гидрохимическом окислении образовывать продукты кислого характера, но при этом присутствует достаточное количество оксидов железа, способное при гидролизе переходить в гидроокись железа, подщелачивая воды окружающей среды. Известно, что в нейтральных и слабощелочных средах происходит практически полная пассивация поверхности сульфидных минералов [10]. Поверхность их покрывается оксидами железа (III), предохраняющими минерал от дальнейшего окисления, тем самым исключая появление локальных очагов разогрева на контактах с аммиачной селитрой. Следовательно, в условиях ОПР отсутствуют минерально-химические факторы, способные подкислять рудничные воды и инициировать разложение аммиачной селитры при контакте с сульфидами.

После изучения достаточно большого количества методик оценки совместимости веществ и материалов для определения термхимического взаимодействия компонентов взрывчатой смеси с образцами руды и шламов был выбран термогравиметрический анализ, основанный на нагревании образцов и смесей с фиксированной скоростью при их постоянном взвешивании. По данным термического анализа, термическая стойкость взрывчатых материалов оценивается по значениям температур начала экзотермического процесса термического разложения и начала ускорения скорости разложения. Информация по кривой термогравиметрического анализа используется как основная при изучении физических и химических процессов и как дополнительная — для объективной расшифровки протекающих процессов, получаемых на кривых дифференциально-термического анализа.

В статьях [7–10] представлены данные о термическом разложении нитрата аммония. На термограммах показано, что разложение сопровождается полиморфными превращениями

при температуре 55, 128 и 171 °С. Температура начала потери массы — 190 °С, разложение происходит с эндотермическим эффектом при 245 °С (–6,9 кДж/г).

В присутствии 20 % пирита все меняется: происходит снижение температуры начала потери массы образца до 170 °С и температуры максимума реакции разложения до 194 °С: разложение нитрата аммония в присутствии пирита идет с экзотермическим эффектом (+4,6 кДж/г). Это свидетельствует о том, что нитрат аммония не устойчив в среде пирита, их взаимодействие протекает с выделением тепла.

Результаты вышеуказанных исследований относятся к «чистым компонентам». В условиях ОПР в качестве компонента взрывчатых смесей используется пористая модифицированная аммиачная селитра.

Для установления реакции взаимодействия применяемой аммиачной селитры с породами и рудами ОПР был выполнен термогравиметрический анализ аммиачной селитры, ее смесей с пиритной и богатой рудой ОПР.

Исследования проводили на приборе NETZSCH STA 409 PC/PG в корундовых тиглях с крышками со скоростью нагрева 20 °С/мин в интервале температур от комнатной до 500 °С. Полученные кривые дифференциально-термического анализа аммиачной селитры (рис. 1) отличаются от классических кривых нитрата аммония [7–10]. Разница обусловлена наличием технологических добавок в составе аммиачной селитры (противослеживающие, большее количество воды и т. д.), оказывающих влияние на ее разложение. На кривых разложения аммиачной селитры (рис. 1) видны эндоэффекты трех обратимых полиморфных превращений (59,6, 101,1 и 135,7 °С).

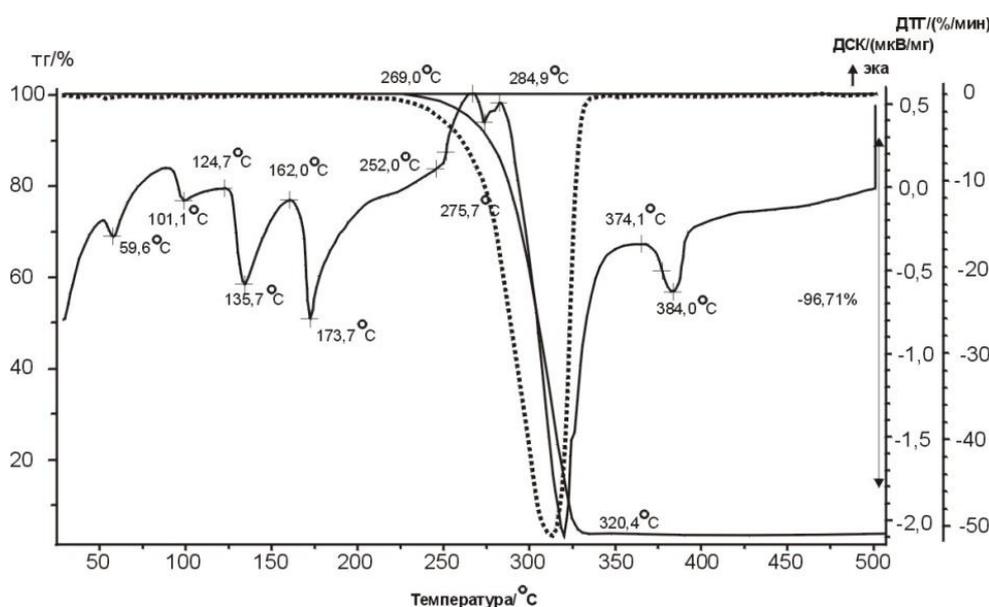


Рис. 1. Термограмма разложения аммиачной селитры

Fig. 1. Thermogram of ammonium nitrate decomposition

В начале разложения аммиачной селитры присутствует двойной экзотермический эффект окисления (269 и 284,9 °С), далее процесс переходит в эндотермическую реакцию с максимумом в 320,4 °С. Также появляется эндоэффект с максимумом 384 °С. Разложение аммиачной селитры происходит с эндотермическим эффектом при температуре 320 °С (–4,3 кДж/г).

В присутствии 20 % пирита (рис. 2, а) так же все меняется. Кроме переходов, с момента плавления присутствует большой экзотермический эффект взаимодействия аммиачной селитры с пиритом с максимумом при 220 °С.

Для смеси аммиачной селитры с 20 % богатой руды (рис. 2, б) картина относительно самой аммиачной селитры принципиально не меняется. Эндотермические эффекты полиморфных переходов при нагревании аммиачной селитры присутствуют (62,4, 134,8 и 172,9 °С). Кроме переходов, с момента плавления наблюдается большой эндотермический эффект быстропротекающего процесса разложения аммиачной селитры (278,6 °С). Также присутствует эндоэффект с максимумом 387,1 °С, как и в случае разложения самой аммиачной селитры. Экзотермический пик взаимодействия аммиачной селитры с рудой отсутствует, что свидетельствует о том, что модифицированная аммиачная селитра устойчива в среде богатой руды ОПР, взаимодействия между ними нет и выделения тепла также не происходит (тепловой эффект реакции отрицательный).

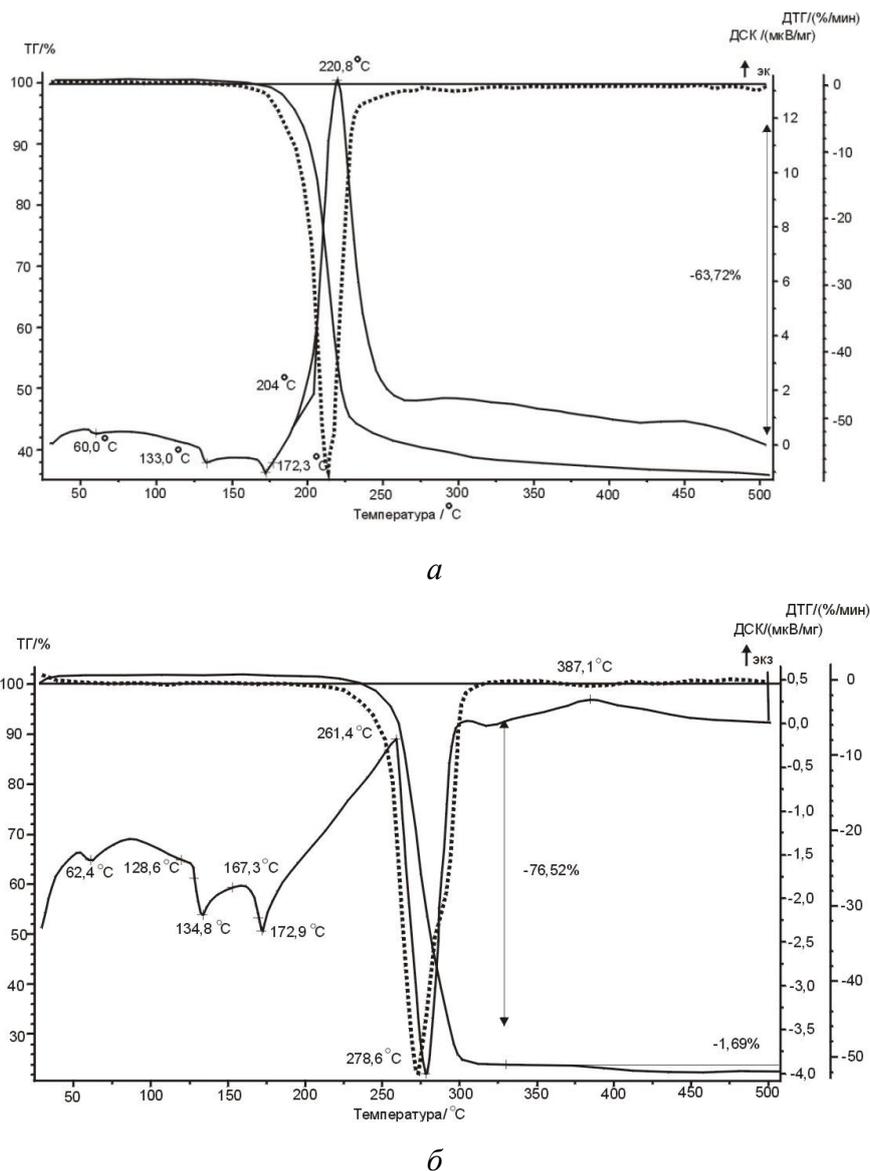


Рис. 2. Термограмма разложения смеси аммиачной селитры с 20 % пирита (а) и с 20 % богатой руды ОПР (б)

Fig. 2. Thermogram of decomposition of mixture of ammonium nitrate with 20 % of pyrite (a), and with 20 % of Olenegorsk underground mine rich ore (b)

Возможное взаимодействие аммиачной селитры с рудой и буровым шламом исследовали в модельном реакторе. Методика испытания совместимости аммиачной селитры при контакте с рудой разработана на основе «Методики испытаний термохимической стабильности ВВ на основе аммиачной селитры» Уральского научно-исследовательского и проектного института

медной промышленности (УНИПРОМЕДЬ) (1982). Признаками несовместимости компонентов смеси считаются увеличение температуры более чем на 2 °С или выделение оксида азота, сопровождающее разложение аммиачной селитры.

Было проведено девять испытаний термостабильности аммиачной селитры в смесях с образцами руды и шламов бурения ОНР. Аммиачную селитру (для увеличения площади контакта ее с испытуемыми образцами) использовали в измельченном виде. Для приготовления смесей использовали три фракции образца бурового шлама (-2,5+0,1, -0,1+0,063, -0,63+0 мм) и такие же три фракции рудного образца. Также испытывали и истертые образцы. Содержание и шлама, и руды в смесях составляло 20 %. Готовую смесь увлажненной «имитатором рудничной воды» аммиачной селитры с образцом помещали в колбу и проводили испытание. Практическое время нахождения аммиачной селитры в скважине в условиях ОНР может составлять не более одной смены, тем не менее был выполнен опыт с увеличенным до 72 ч временем испытания. Из рассматриваемых образцов шламов в качестве испытуемого был выбран образец, содержащий максимальное количество серы. Испытывали также и пиритный образец фракции -0,1+0 мм, время испытания — 7 ч. Во всех опытах температура реакционной смеси не изменялась. Газовыделение отсутствовало.

Полученные данные позволяют утверждать, что взаимодействия аммиачной селитры с рудой Оленегорского подземного рудника не происходит.

Аналогичные результаты были получены в работе [11], где испытывали совместимость промышленного ВВ «Грамотол Т-20» с образцами горных пород подземного рудника АО «Гайский ГОК».

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

В образцах руды и шламов бурения Оленегорского подземного рудника содержание серы находится в количестве от 0,002 до 0,017 %.

Рудничные воды Оленегорского подземного рудника при продолжительном контакте с железорудным шламом в присутствии воздуха приобретают слабощелочную реакцию — рН 8–9. Появление локальных очагов разогрева на контактах с аммиачной селитрой исключено.

По данным термогравиметрического анализа, взаимодействия между аммиачной селитрой и богатой рудой Оленегорского подземного рудника нет. Выделения дополнительного тепла в процессе также не происходит, это же подтверждают результаты испытаний термостабильности аммиачной селитры при контакте с рудой.

Аммиачная селитра — основной компонент ВВ, применяющегося на руднике, с богатой рудой Оленегорского подземного рудника не взаимодействует. Заряды на основе селитры могут безопасно находиться в скважинах в течение 3 дней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2017 году. М., 2018. 420 с. URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/.pdf.
2. Инструкция по предупреждению и тушению подземных эндогенных пожаров на горнорудных предприятиях Министерства цветной металлургии СССР: от 04.09.1981. М., 1981. 43 с.
3. Инструкция по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритсодержащие колчеданные руды: от 27.03.1991. М., 1991.
4. Галкин В. В., Велтужских В. Л., Павлютенков В. М. Причины разложения и отказов заряда акватол // Безопасность труда в промышленности. 1988. № 10. С. 47–49.
5. Коваленко И. Л., Куприн В. П. Исследование причин самопроизвольного разложения аммиачно-селитренных горячельющихся ВВ на пиритсодержащих рудах // Матеріали І Всеукраїнської науково-практ. конф. «Україна наукова — 2001». Дніпропетровськ, 2001. Т. 9. С. 43–50.
6. Оценка химической совместимости промышленных ВВ с разрабатываемыми породами / В. В. Пупков [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 4. С. 37–40.
7. Коваленко И. Л., Куприн В. П. Взаимодействие эмульсионных взрывчатых веществ и их компонентов с сульфидными минералами // Взрывное дело. 2010. Вып № 103/60. М., 2010. С. 154–170.
8. Горинов С. А., Маслов И. Ю., Шеменев В. Г. К вопросу о выборе эмульсионных взрывчатых веществ при добыче сульфидсодержащих горных пород // Технология и безопасность взрывных работ: материалы науч.-произв. семинара по взрывным работам 2016 г. Екатеринбург: Ин-т горного дела

УрО РАН, 2016. С. 70–75. **9.** Коваленко И. Л., Куприн В. П., Савченко Н. В. Принципы разработки ЭВВ для безопасной отбойки сульфидсодержащих пород // Информ. бюл. Украинского союза инженеров-взрывников. 2013. Вып. 3 (20). С. 8–13. **10.** Коваленко И. Л., Куприн В. П. Ингибирование взаимодействия пирита с аммиачно-селитренными взрывчатыми веществами // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. 2013. Вип. 1 (11). С. 84–90. **11.** Исследование химической совместимости Граммотолла Т-20 и Граммонита ТММ с вмещающими горными породами и внутрискважинными водами подземного рудника ПАО «Гайский ГОК» / Г. И. Айбиндер [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 4. С. 47–52.

Сведения об авторах

Козырев Сергей Александрович — доктор технических наук, главный научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

Власова Елена Анатольевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН.

E-mail: vlasova@goi.kolasc.net.ru

Author Affiliation

Sergej A. Kozyrev — Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

Elena A. Vlasova — PhD (Engineering), Senior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: vlasova@goi.kolasc.net.ru

Библиографическое описание статьи

Козырев, С. А. Исследование химического взаимодействия аммиачной селитры с сульфидсодержащими минералами в составе гематит-магнетитовых кварцитов Оленегорского месторождения / *С. А. Козырев, Е. А. Власова* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 54–60.

Reference

Kozyrev Sergej A., Vlasova Elena A. Investigation of the Chemical Interaction of Ammonium Nitrate with Sulfide-Containing Minerals in the Composition of Hematite-Magnetite Quartzite of the Olenegorsk Deposit. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 54–60. (In Russ.).

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ КАМЕРНО-СТОЛБОВОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ НА РУДНИКЕ КАРНАСУРТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ*

А. В. Матыцын¹, А. В. Ловчиков², А. Н. Любин², А. А. Королев¹

¹ООО «Ловозерский ГОК», Ревда

²Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

Описаны горно-геологические и геомеханические условия разработки Ловозерского месторождения, которое является склонным и опасным по горным ударам. Рассмотрены технические решения, обеспечивающие безопасную эксплуатацию конструктивных элементов камерно-столбовой системы разработки. Приведены перспективы развития рудника Карнасурт.

Ключевые слова:

редкометальное месторождение, рудные залежи, тектонические напряжения, рудник, целик, горные удары, устойчивый пролет, самоходное оборудование.

SAFETY IMPROVEMENT OF ROOM-AND-PILLAR MINING AT KARNASURT MINE AND IT'S DEVELOPMENT PROSPECTS

Andrew V. Matytsyn¹, Aleksandr V. Lovchikov²,

Aleksandr N. Lyubin², Anatoliy A. Korolev¹

¹Lovozerky GOK JSC

²Mining Institute of FRC KSC RAS, Apatity

Abstract

The degree of development of explored mineral resources of rare-earth elements in Russia is relatively low. At the same time, domestic needs for rare metals in our country remain relevant and even tend to increase. The only producer of loparite concentrate — mineral raw materials of rare metals (rare-earth metals, niobium, and tantalum) in Russia is Lovozerky GOK JSC. Loparite ores are mined by the Karnasurt underground mine at the Karnasurt and Kedykvyrpakhk parts using a room-and-pillar method in rockburst-prone and rockburst-hazardous conditions of the Lovozero deposit, represented by thin flat ore deposits. In order to eliminate the danger of rockbursts in the main haulage excavations of the Karnasurt mine, it was recommended to create relief slots in the walls of the entry pillars to a depth of 2 m. Due to them, the concentration of gravitational-tectonic stresses is transferred from the contour of drifts deep into the pillars, and as a result the danger of rockbursts in the excavations is eliminated. The maintenance of the direct roof in the stopping blocks is carried out by compliant intra-block pillars by creating relief slots in them. To substantiate a steady span between them, a technique was developed that takes into account the effect of horizontal tectonic forces on the grid parameters of intra-block pillars. Technical solutions for the selective extraction of balance reserves in the faces of stopping excavations are also considered. In the scale of industrial development, mining excavations are driven using a complex of self-propelled equipment. On the basis of the technical solutions developed and applied at the present time, the prospects of Lovozerky GOK JSC development are considered, including two stages of loparite ore mining at the Karnasurt and Kedykvyrpakhk sites. At the first stage, the mine's annual output is expected to increase to 500 thousand tons by 2026. At the second stage, in the period from 2027 to 2035, an increase in annual output to 550 thousand tons will be achieved.

Keywords:

rare-metal deposit, ore bodies, tectonic stresses, underground mine, pillar, rockbursts, steady span, self-propelled equipment.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-05-00563а.

Россия занимает второе место в мире по разведанным запасам редких металлов [1], однако степень освоения этих минерально-сырьевых ресурсов в нашей стране крайне низка [1, 2]. При этом прогноз потребностей России в редких металлах показывает их рост, например, по редкоземельным металлам (от 2 тыс. т — в 2014 г. до 20 тыс. т — к 2032 г. и до 100 тыс. т — к 2062 г.) [3].

Единственный производитель лопаритового концентрата — минерального сырья редких металлов (РЗМ, ниобия, тантала) в России — ООО «Ловозерский ГОК». Технологией по переработке лопаритового концентрата обладает ОАО «Соликамский магниевый завод». Научное сопровождение работ ООО «Ловозерский ГОК» осуществляют Горный институт и Институт химии КНЦ РАН. Обеспеченность разведанными запасами ООО «Ловозерский ГОК» оценивается как высокая и составляет не менее 90 лет.

Изученная толща лопаритового комплекса разделена на пять серий, каждая из которых в верхней части представлена фойяитами, сменяющимися уртитам, а в нижней части — чередованием луявритов-фойяитов. В этих сериях отдельные слои (горизонты) незначительной мощности, называемые маркирующими, по простиранию прослеживаются на огромные расстояния. В них сосредоточены лопаритовые руды, как правило, с относительно высоким содержанием минерала в центре слоев, снижающимся к лежащему и висящему бокам до значения бортового. Образующиеся рудные залежи имеют мощность от менее 1 и до 3–5 м. Есть рудные залежи мощностью до 10 м, но с относительно низким содержанием и сложным распределением полезного компонента по мощности.

Для маркирующих горизонтов принята определенная номенклатура, включающая номер серии (римская цифра) и порядковый номер маркирующего горизонта от начала этой серии (арабская цифра).

Исторически сложилось, что при разведке отдельных участков Ловозерского редкометалльного месторождения им давались названия в соответствии с названиями гор, на склонах которых велись работы. В итоге получилось, что единое по сути месторождение формально разделено на 12 участков, при этом его части имеют разные названия. Добыча лопаритовых руд ведется только на двух из них — Карнасурт и Кедыквырпахк, что составляет около 5 % от общих запасов месторождения [1]. Они являются продолжением друг друга и имеют идентичное геологическое строение.

В настоящее время балансовые запасы двух участков Карнасурт и Кедыквырпахк Ловозерского редкометалльного месторождения лопаритовых руд разрабатываются подземным способом рудником Карнасурт ООО «Ловозерский ГОК» на двух рудных горизонтах — I-4 и II-4. Расстояние между залежами составляет 90–110 м по вертикали (рис. 1).

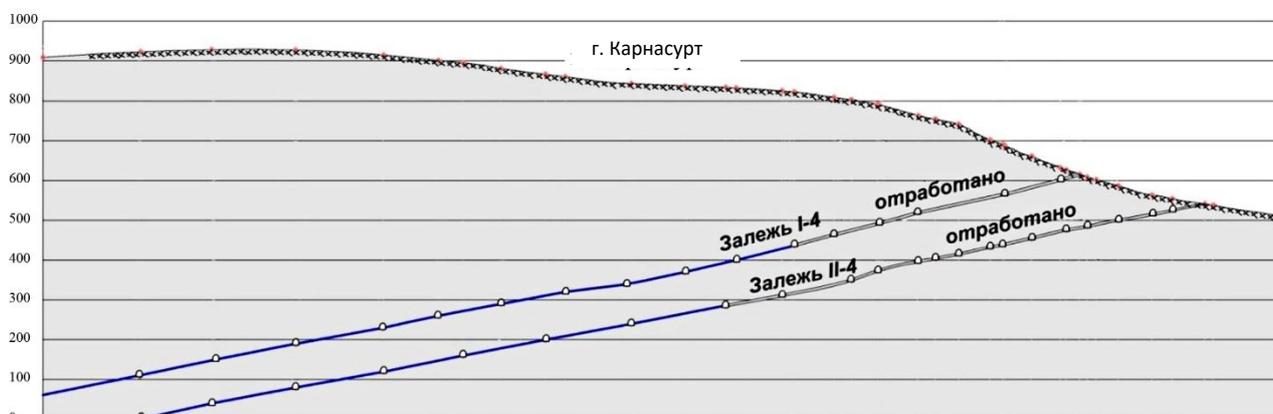


Рис. 1. Схематический разрез вкрест простирания уртитового и малиньитового пластов Ловозерского месторождения

Fig. 1. A schematic section transverse to the strike of the Lovozero urtite and malignite beds

На рис. 1 показано, что рудный горизонт I-4 выходит на поверхность на отметке 610 м. Он прослежен по простиранию на расстояние 3,6 км с выходом на поверхность на отметках 450...700 м, по падению — на 1650 м и разрабатывается на участке Карнасург. Сверху вниз он сложен уртитамы мощностью от 0,20 до 0,54 м и мезократовыми луювритами мощностью от 0,1 до 0,48 м. Его средняя мощность в контуре постоянных кондиций, утвержденных в 2017 г. составляет 0,87 м, угол падения изменяется от 8 до 14°.

Рудный горизонт II-4 выходит на поверхность на отметке 530 м. Он прослежен по простиранию на расстояние 4,3 км с выходом на поверхность на отметках 450...700 м, по падению — на 1950 м и разрабатывается на участках Карнасург и Кедыквырпахк. Висячем боку он сложен уртитамы, в центральной части — малиньитами, в лежащем боку — фойяитами. Мощность этого рудного горизонта изменяется от 0,33 до 1,00 м, а средняя мощность в контуре утвержденных в 2015 г. постоянных кондиций составляет 0,50 м, угол падения изменяется от 5 до 11°.

В связи с тем, что рудный горизонт I-4 представлен уртитамы, а II-4 — малиньитами, в производственной деятельности рудника они именуется как уртитовый (горизонт I-4) и малиньитовый (горизонт II-4) пласты. На обоих пластах отсутствуют четкие литологические границы, поэтому в соответствии с утвержденными постоянными кондициями их оконтуривание осуществляется по бортовому содержанию в пробе лопарита 1 %.

Средний минеральный состав руд включает полевой шпат — 48,8 %, нефелин — 26,2 %, эгирин — 19,6 %, лопарит — 3,2 %, остальное — вторичные и акцессорные минералы. Главным рудным минералом является лопарит. Содержание лопарита в руде по уртитовому пласту изменяется от 1,6 до 4,3 %, по малиньитовому — от 3,5 до 8,9 %.

До настоящего времени участки Карнасург и Кедыквырпахк Ловозерского месторождения с высотной отметки +430 м и выше вскрыты штольнями. Нижележащие горизонты вскрыты слепым вертикальным стволом, а также вспомогательными и вентиляционными уклонами.

Существующий двухклетевой слепой ствол «Слепая-2», оборудованный двумя клетями типа 11НВ3,1Р, пройден с отметки +430 м до отметки +280 м и предназначен для спуска и подъема людей и грузов, в том числе руды и породы в шахтных вагонетках ВГ-2,2.

Основной трассой электровозной откатки является главный квершлаг горизонта +430 м. На эту выработку руда подается с нижних горизонтов в вагонетках через ствол шахты, а также по рудоспускам с верхних горизонтов уртитового пласта с последующей ее транспортировкой на обогатительную фабрику.

За последние годы предприятие вложило в обновление устаревшего оборудования порядка 800 млн руб. Основным направлением инвестиционных программ является выполнение горных работ по вскрытию и подготовке новых горизонтов, изменению технологии добычи руды и применяемого оборудования, внедрение более надежных, современных систем разработки, совершенствование технологии обогащения. Увеличение выпуска концентрата на горно-обогатительном комбинате планируется в непосредственной связи с модернизацией основных производственных процессов. Реализацию намеченных планов затрудняют следующие горнотехнические факторы: ограниченная выемочная мощность 1,2 м для использования самоходного оборудования в очистном пространстве, сложные горно-геологические условия и наличие столбчатых целиков в очистных выработках, которые расположены по достаточно плотной сетке.

За 68 лет работы рудника Карнасург в массиве горных пород образовалось более 7 млн м² выработанного и ничем незаполненного пространства. Для контроля состояния подработанного массива горных пород на руднике в подземных выработках действуют две сейсмостанции и проводится комплекс непрерывных наклономерно-деформометрических наблюдений службой прогнозирования горных ударов рудника. Контроль состояния массива ведется в непрерывном режиме, фиксируются даже самые незначительные события с указанием конкретного места проявления горного давления, что помогает обеспечивать безопасность выполнения текущих и проводить планирование горных работ на перспективу.

Руда и вмещающие породы Ловозерского месторождения (луявриты, уртиты, фойяиты и др.), относящиеся к классу нефелиновых сиенитов, являются высокопрочными скальными породами (см. табл.). Участки Карнасурт и Кедыквырпахк по условиям разработки и деформационно-прочностным свойствам вмещающих пород и руды отнесены к склонным и опасным по горным ударам. Добыча руды на этих участках производится по камерно-столбовой системе разработки с поддержанием подработанных покрывающих пород постоянными целиками [4].

Физико-механические свойства пород и руд рудника Карнасурт
Physical-chemical properties of the Karnasurt mine rocks and ores

Параметр Characteristic	Фойяит Foyaite	Уртит Urtite	Луюврит Lujavrite	Малиньит (руда) Malignite (ore)
Плотность, т/м ³ Density, t/m ³	2,65	2,75	2,6–2,96	2,7
Предел прочности, МПа Ultimate strength, MPa				
при сжатии at compaction	160–243	247	187–332	168
при растяжении at tension	5,9–8,5	9,5	7,1–12	8,5
Модуль упругости, Е·10 ⁻⁴ , МПа Elasticity module, E·10 ⁻⁴ , MPa	5,1–6,0	7,6	4,6–7,3	6,0
Коэффициент/ratio				
Пуассона Poisson	0,25–0,30	0,27	0,27–0,31	0,25
хрупкости Fragility	25–32	26	24–31	21

По падению пласты участков месторождения делят на панели шириной от 50 до 120 м, которые в зависимости от глубины разработки отделены друг от друга ленточными опорными околотрековыми целиками шириной от 3 до 10 м.

Панели, в свою очередь, по простиранию делят на очистные блоки длиной 50–80 м, между которыми оставляются опорные ленточные междублоковые целики шириной 3–10 м. Опорные ленточные околотрековые и междублоковые целики рассчитываются по весу покрывающих пород методом Турнера — Шемякова [5]. В расчетах параметров конструктивных элементов системы разработки учитывается высокая тектоническая напряженность массива Ловозерского месторождения.

Инструментальными натурными измерениями установлено, что в породах массива шахтного поля рудника Карнасурт действуют тектонические напряжения горизонтального направления по азимутам $A = (50^\circ - 90^\circ) \pm 180^\circ$, величиной 40–600 МПа, которые на достигнутых глубинах разработки в 4–6 раз превышают величину гравитационных напряжений от веса толщи покрывающих пород [6].

Для безопасного ведения подземных горных работ в таких условиях вопросы управления геомеханическими процессами для рудника Карнасурт становятся особенно значимыми, так как в последние годы поддержание непосредственной кровли в очистных блоках осуществляется внутриблоковыми целиками, выполняющими роль крепи. Их размеры 1–2×3–4 м выбраны в основном по технологическим соображениям. В зависимости от трещиноватости и устойчивости пород кровли расстояние между целиками изменяется от 4 до 12 м.

Во избежание горных ударов внутриблоковым целикам придается искусственная податливость путем создания в них разгрузочных щелей (камуфлетным взрыванием шпуровых зарядов или бурением строчки скважин). В основных откаточных выработках рудника — штреках, на участках, опасных по горным ударам, в стенках околоштрековых целиков также формируют разгрузочные щели на глубину 2 м. За их счет концентрация гравитационно-тектонических напряжений переносится с контура штреков вглубь целиков, вследствие чего опасность горных ударов в выработках устраняется. Таким образом, эти мероприятия позволяют управлять высокой тектонической напряженностью массива горных пород месторождения.

Следует отметить, что применяемые опорные околоштрековые и междублоковые целики являются низкими и широкими, поскольку ширина целиков d всегда больше их высоты h ($d/h > 1$). При таком соотношении параметров целика большая его часть работает в условиях объемного сжатия. Это способствует повышению несущей способности целика, которая учитывается коэффициентом формы, определяемого по формуле Церна [7].

Кроме околоштрековых, между- и внутриблоковых целиков важным конструктивным элементом камерно-столбовой системы разработки является устойчивый пролет кровли в очистных выработках, который формируется по кровле очистного пространства между внутриблоковыми целиками. Наличие горизонтальных тектонических напряжений в массиве горных пород создает дополнительную концентрацию напряжений в зонах сопряжений кровли очистного пространства с плоскостью очистного забоя и со стенками целиков, в которых их величина может превосходить предел прочности пород на сжатие. В результате чего в этих зонах происходит разрушение пород кровли с последующим их отслоением [8].

Поскольку податливые внутриблоковые целики в рассматриваемых условиях выполняют функцию крепи, был применен методический подход, использованный в работе И. В. Баклашова, О. В. Тимофеева для расчетов штанговой крепи [9]. На основе предложенных ими положений была разработана методика расчета сетки расположения внутриблоковых целиков для поддержания непосредственной кровли очистных выработок как тонкой плиты, отслаивающейся от основной кровли. Эта плита рассматривается как трехшарнирная система, нагруженная собственным весом и горизонтальными тектоническими силами, для обрушения которой необходимо преодолеть сопротивление пород в шарнирах [10].

С ростом горизонтальных тектонических напряжений будет расти сопротивление трехшарнирной системы, следовательно, и величина устойчивого пролета кровли выработки будет увеличиваться. Это объясняется тем, что силы бокового давления препятствуют развитию растягивающих напряжений в отслаивающемся слое горных пород кровли. Увеличение устойчивого пролета поддерживаемой кровли очистного пространства также будет способствовать снижению суммарных потерь руды во внутриблоковых целиках, так как при заданных параметрах блока их количество с той же площадью каждого целика будет уменьшаться.

Применение описанных выше методов управления происходящими геодинамическими процессами при разработке Ловозерского месторождения обеспечивает в настоящее время относительно безопасные условия ведения горных работ на глубине до 600 м от земной поверхности и допустимые величины потерь руды в целиках 25–30 % для систем разработки с открытым очистным пространством.

Для улучшения эколого-экономических показателей ООО «Ловозерский ГОК» разработано инновационное техническое решение [11] с селективной выемкой балансовых запасов в очистных забоях Карнасуртского и Кедыквырпахкского участков месторождения и с применением самоходного или переносного оборудования, сущность которого заключается в следующем. После проведения подготовительных и нарезных выработок блок по восстанию разбивают на парные заходки, которые отрабатывают по простиранию. Ширину второй заходки в каждой паре определяют из условия размещения бурового и доставочного оборудования, а первой — из условия возможности максимальной глубины бурения шпуров применяемым оборудованием.

Рудную залежь вынимают по восстанию двумя заходками одновременно с подрывкой пород лежащего бока во второй заходке, которую располагают с отставанием от первой на величину уходки за цикл.

Эффективность разработанного технического решения селективной выемки тонких пологих рудных тел с применением переносного оборудования для условий рудника Карнасурт оценивалась по критерию «себестоимость производства 1 т лопаритового концентрата». Расчетами установлено, что за счет сокращения затрат на добычу и переработку примешиваемых к рудной массе вмещающих пород экономический эффект с 1 т полученного концентрата составит 14,2 тыс. руб.

В настоящее время на дорабатываемых участках шахтного поля рудника Карнасурт, которые расположены в приповерхностной зоне и куда есть доступ через ранее использовавшиеся штольни, подготовка блоков осуществляется комплексом самоходного оборудования. Бурение шпуров диаметром 43 мм осуществляется буровыми установками УБШ-222-03 и УБШ-222-04 (рис. 2, а), уборка горной массы — погрузочно-доставочными машинами Sandvik LH203 и WJ-1,5 фирмы Nanchang Kama Co. с емкостью ковша 1,5 м³ (рис. 2, б). Проведенные наблюдения свидетельствуют о том, что производительность труда рабочих проходческого забоя и скорость проведения горных выработок с применением самоходного оборудования на 55,7 % выше, чем при использовании переносного оборудования.



а



б

Рис. 2. Технологические процессы проведения горной выработки с применением комплекса самоходного оборудования:
а — бурение шпуров установкой УБШ-222-03; б — уборка горной массы погрузочно-доставочной машиной Sandvik LH203

Fig. 2. Technological processes of driving of a mining opening with applying self-moving equipment:
а — borehole drilling by UBSH-222-03 drill rig; б — recovery of the broken rock mass by Sandvik LH203 load-haul dumper

Проектными и нормативными документами 2015–2018 гг. рассмотрены перспективы развития ООО «Ловозерский ГОК», включающие два этапа разработки запасов лопаритовой руды на участках Карнасурт и Кедыквырпахк и запланировано понижение горных работ на руднике Карнасурт до глубины 900 м. Первый этап начинается в 2018 г. и заканчивается в 2026 г. В данный период отработка запасов, которые были вскрыты до горизонта +280 м, дополнительных объектов капитального строительства не потребует. На этом этапе предусматривается увеличение производительности рудника с 400 до 500 тыс. т руды в год. Второй этап намечен на период с 2027 по 2035 гг., здесь предусматривается вскрытие запасов проведением горно-капитальных вскрывающих выработок. Среди вариантов схем вскрытия рассматриваются вскрывающие выработки под самоходное оборудование. В качестве базовой технологии обсуждается использование вариантов камерно-столбовой системы разработки с применением бурового и погрузочно-доставочного самоходного оборудования для проведения горных выработок. За счет механизации горных работ за период с 2027 по 2035 гг. предусматривается увеличение производительности рудника до 550 тыс. т руды в год.

Заключение

Увеличение выпуска концентрата на ООО «Ловозерский ГОК» планируется в непосредственной связи с модернизацией основных производственных процессов. Главными горнотехническими факторами, сдерживающими реализацию намеченных планов, являются недостаточная для применения самоходного оборудования выемочная мощность 1,2 м и условия разработки камерно-столбовой системой склонных и опасных по горным ударам участков Ловозерского месторождения.

Для устранения опасности горных ударов в основных откаточных выработках рудника Карнасурт в стенках околоштрековых целиков на глубину 2 м предложено создавать разгрузочные щели, за счет которых концентрация гравитационно-тектонических напряжений переносится с контура штреков вглубь целиков, вследствие чего опасность горных ударов в выработках устраняется.

Поддержание непосредственной кровли в очистных блоках осуществляется податливыми внутриблоковыми целиками путем создания в них разгрузочных щелей. В расчетах устойчивого пролета между целиками учитывается влияние действия горизонтальных тектонических сил на обоснование параметров сетки их расположения. Кроме того, рассматриваются технические решения возможности селективной выемки балансовых запасов в забоях очистных выработок. В масштабах промышленного освоения проводится проходка горных выработок с применением комплекса самоходного оборудования.

Перспективные технические решения развития ООО «Ловозерский ГОК» включают два этапа разработки запасов лопаритовой руды на участках Карнасурт и Кедыквырпахк до глубины 900 м от земной поверхности. На первом этапе отработка запасов будет осуществляться до горизонта +280 м без дополнительных капитальных работ. Второй этап предусматривает вскрытие запасов проведением горно-капитальных вскрывающих выработок. Среди вариантов схем вскрытия рассматриваются вскрывающие выработки под самоходное оборудование. В качестве базовой технологии рассматриваются варианты камерно-столбовой системы разработки с применением на отдельных участках бурового и погрузочно-доставочного самоходного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модель развития промышленности и рынка РЗМ в России / *Н. А. Архипова [и др.]* // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 13–18.
2. Перспективы обеспечения потребностей высокотехнологичных производств России редкометалльным минеральным сырьем / *Л. З. Быховский [и др.]* // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 106–115.
3. *Kezina D.* Russia is making a comeback on the global rare earth metals market. URL: https://www.rbth.com/science_and_tech/2014/09/30/russia_is_making_a_comeback_on_the_global_rare_earth_metals_40245.html (дата обращения: 30.01.2019).
4. Повышение эффективности системы разработки на руднике Карнасурт / *И. И. Бессонов [и др.]* // Горн. журн. 1990. № 1. С. 19–21.
5. *Макаров А. Б.* Практическая геомеханика: пособие для горных инженеров. М.: Горная книга, 2006. 391 с.
6. *Турчанинов И. А., Марков Г. А., Ловчиков А. В.* Напряженное состояние пород в Ловозерском массиве // Разработка рудных месторождений Кольского полуострова. Апатиты: КФАН СССР, 1973. С. 3–11.
7. *Галаев Н. З.* Управление состоянием массива горных пород при подземной разработке рудных месторождений: учебник для вузов. М.: Недра, 1990. 176 с.
8. *Ловчиков А. В.* Вывалообразование из кровли очистных выработок пологопадающих маломощных рудных залежей в тектонически напряженном массиве // Изв. вузов. Горн. журн. 2014. № 1. С. 21–26.
9. *Баклашов И. В., Тимофеев О. В.* Конструкция крепей и отделок. М.: Недра, 1979. 263 с.
10. *Ловчиков А. В.* О расчетах устойчивости камерных выработок при гравитационном и гравитационно-тектоническом напряженном состоянии массива // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. С. 281–285.
11. *Любин А. Н., Королёв А. А.* Оценка эффективности селективной выемки тонких пологих рудных тел // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли — формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: материалы Всерос. науч. техн. конф. с участием иностр. специалистов (13–15 октября 2014 г., Апатиты): в 2 т. Т. 2. СПб.: Реноме, 2015. С. 49–54.

Сведения об авторах

Матыцын Андрей Васильевич — генеральный директор ООО «Ловозерский ГОК»

E-mail: a.matytsyn@oolgok.ru

Ловчиков Александр Васильевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: vocson@goi.kolasc.net.ru

Любин Александр Нестерович — кандидат технических наук, научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: ljubin@goi.kolasc.net.ru

Королев Анатолий Алексеевич — заместитель главного инженера ООО «Ловозерский ГОК»

E-mail: a.korolev@ooolgok.ru

Author Affiliation

Andrew V. Matytsyn — Director General of Lovozersky GOK JSC

E-mail: a.matytsyn@ooolgok.ru

Aleksandr V. Lovchikov — Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: vocson@goi.kolasc.net.ru

Aleksandr N. Lyubin — PhD (Engineering), Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: ljubin@goi.kolasc.net.ru

Anatoliy A. Korolev — Deputy Chief Engineer of Lovozersky GOK JSC

E-mail: a.korolev@ooolgok.ru

Библиографическое описание статьи

Повышение безопасности камерно-столбовой системы разработки на руднике Карнасурт и перспективы его развития / *А. В. Матыцын [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 61–68.

Reference

Matytsyn Andrew V., Lovchikov Aleksandr V., Lyubin Aleksandr N., Korolev Anatoliy A. Safety Improvement of Room-and-Pillar Mining at Karnasurt Mine and Its Development Prospects. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 61–68. (In Russ.).

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ НАСЫПНОГО ГРУНТОВОГО СООРУЖЕНИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ В ЕГО ТЕЛЕ ЗОНЫ ПОВЫШЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Н. А. Калашник

ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

Рассмотрены особенности насыпных грунтовых сооружений гидроэнергетики и горных предприятий Мурманской обл. На основе анализа мирового опыта эксплуатации таких сооружений выявлены специфические особенности снижения их надежности, заключающиеся в формировании в теле сооружения скрытых зон неоднородностей и разжижения грунтов с их последующим развитием в зоны повышенной фильтрации. Многочисленными георадарными и сейсмотомографическими определениями на насыпных гидротехнических сооружениях неоднократно выявлялись в теле ограждающих сооружений скрытые зоны неоднородностей и повышенной фильтрации. В данной работе, чтобы исследовать состояние и дать оценку надежности насыпного грунтового сооружения, в программном комплексе PLAXIS была разработана компьютерная гидрогеомеханическая 3D-модель. В модели, исходя из данных натурных наблюдений, для грунтов исследуемого сооружения задавался упругопластический механизм их деформирования.

В качестве изменяющихся влияющих параметров были приняты: уровни воды (минимальный, средний, максимальный/паводковый) в верхнем бьефе; сцепление и угол внутреннего трения грунтов (в тенденции уменьшения значений при разжижении грунтов); размеры формирующейся зоны (минимальная 10×6×3,5 м, средняя 15×8×4 м, максимальная 20×10×5 м) повышенной фильтрации; скорость фильтрации воды (в тенденции возрастания) в зоне. Выполнено многовариантное параметрическое моделирование исследуемого сооружения, на основании результатов которого установлены особенности влияния геометрических и гидродинамических характеристик зоны повышенной фильтрации (с учетом значительной изменчивости основных деформационных свойств грунтов в контурах зоны) на надежность сооружения. Выявлены модельные зависимости надежности насыпного грунтового сооружения от параметров сцепления и угла внутреннего трения разжижаемых грунтов при различной степени фильтрационных процессов. Установлены граничные значения сцепления и угла внутреннего трения грунтов в зоне повышенной фильтрации, при которых надежность сооружения для рассматриваемых условий не обеспечивается.

Ключевые слова:

компьютерное моделирование, гидрогеомеханическая 3D-модель, насыпное грунтовое сооружение, зона фильтрации, надежность.

ASSESSMENT OF RELIABILITY OF A BULK SOIL DAM DURING FORMATION OF AN INCREASED FILTRATION ZONE IN ITS BODY

Nadezhda A. Kalashnik

Mining Institute of KSC RAS, Apatity, Russia

Abstract

Features of bulk soil constructions of hydropower and the mining enterprises of Murmansk region are considered. Based on the analysis of international experience of operation of such constructions, the specific features of decrease in their reliability consisting in formation in a body of a construction of the hidden zones of inhomogeneities and colliquations of soils with their subsequent development in the zones of the increased filtration, are revealed. Numerous georadar and seismotomographic measurements have repeatedly demonstrated the hidden zones of inhomogeneities and increased filtration in the body of the protecting constructions of the bulk hydraulic engineering constructions. We have developed the computer 3D hydrogeomechanical model to study the state and assess the reliability of bulk soil construction using PLAXIS program complex. The model, based on field observations, set the

elasto-plastic deformation mechanism for the studied construction soils. The varying influencing parameters were: water levels (minimum, average, maximal/flood) of the top canal pound, coupling and angle of internal friction of soil (the values decrease when soils liquefy), dimensions of the forming zone (minimum 10×6×3,5 m, average 15×8×4 m, maximum 20×10×5 m) of the increased filtration, water filtration rate (increasing trend) in the zone. We carried out the multiple parametrical model operation of the studied construction and revealed the features of influence of the geometrical and hydrodynamic characteristics of the increased filtration zone on construction reliability, with regard to the significant variability of the main deformation properties of soils in the contours of the zone. Model dependences of bulk soil construction reliability on parameters of coupling and angle of internal friction of liquefied soils in different filtration processes. We determined the boundary values of coupling and angle of internal friction of soils in the high filtration zone when the considered conditions showed the unreliability of the construction.

Keywords:

computer modeling, hydro geomechanical 3D model, bulk soil dam, filtration zone, reliability.



Введение

Гидротехнические сооружения (ГТС) Мурманской обл. представляют собой насыпные грунтовые плотины гидроэлектростанций (ГЭС) почти на всех основных реках, а также ограждающие дамбы хвостохранилищ горных предприятий региона [1]. Согласно законодательно-нормативным документам и правилам [2, 3], эксплуатация таких сооружений должна выполняться по требованиям, предъявляемым к ответственным и опасным объектам. Снижение механической и фильтрационной устойчивости ограждающих насыпных сооружений — плотин и дамб приведет к частичной или полной потере их функционального назначения. Дальнейшее развитие неконтролируемых фильтрационно-деформационных процессов может привести к возникновению чрезвычайной ситуации и даже к аварии с вытекающими отсюда социально-экономическими последствиями: ущерб окружающим природно-техническим системам, повреждение зданий и механизмов и т. п.; убытки вследствие остановки основного производства; затраты на локализацию мест разрушения, восстановительные работы, возмещение принесенного вреда и ущерба [4–6].

В мировой практике эксплуатации насыпных грунтовых сооружений известны случаи потери их механической прочности и фильтрационной устойчивости, в результате чего произошли аварии на плотинах ГЭС (Киселевская (Россия), Фонтенель (США), Боулдерхэд (Англия) и др. [4, 5, 7]). На основе анализа этих аварий [7–9] выявлено, что их основной причиной является образование в теле ограждающего сооружения локального фильтрационного канала, который в последующем развивается в зону повышенной фильтрации, вызывающую необратимые фильтрационно-деформационные процессы. В конечном результате происходит интенсивный размыв нижнего откоса, образование прорана или полное разрушение ограждающего сооружения на данном участке. Поэтому исследование надежности насыпного грунтового сооружения при образовании в его теле зоны повышенной фильтрации в целях минимизации рисков аварий и чрезвычайных ситуаций является актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение.

Экспериментальные исследования

Горным институтом КНЦ РАН ранее были выполнены комплексные георадарные и сейсмотомографические исследования насыпной грунтовой плотины каскада Нивских ГЭС на р. Пиренга и ограждающих дамб хвостохранилищ основных горнодобывающих предприятий Мурманской обл. в целях оценки их состояния, уточнения внутренней структуры, положения депрессионной поверхности фильтрующихся вод и рельефа подстилающего породного основания [10, 11]. В работе [10] дано детальное описание основных технических характеристик, свойств грунтов и геометрических размеров плотины. Георадарные и сейсмотомографические исследования выполнялись синхронно по гребню и низовому откосу плотины, при этом

подпочвенное зондирование достигало 15–20 м, с разрешающей способностью 0,2–0,5 м. По данным зондирования были уточнены структура плотины, контур подстилающего моренного основания, старое русло реки, определена и трассирована депрессионная поверхность грунтовых вод в теле плотины, а также выявлены скрытые локальные зоны неоднородности. При исследовании ограждающих дамб хвостохранилищ также были выявлены скрытые зоны повышенного водонасыщения, их горизонтальные размеры составляли 10–20 м, вертикальные — 3–5 м [7, 8].

Гидрогеомеханическая 3D-модель

Для выявления особенностей влияния формирующейся зоны повышенной фильтрации на надежность насыпного грунтового сооружения была разработана его компьютерная гидрогеомеханическая 3D-модель, отражающая разные уровни воды на верховом откосе, геометрические размеры сооружения и свойства слагающих его грунтов, геологические слои подстилающего основания (рис. 1, а). Ширина сооружения была принятой примерно 100 м, высота — около 20 м.

Для имитации образования зоны повышенной фильтрации в модели задавался поперечный — на всю ширину сооружения — трапециевидальной формы канал высотой 3,5 м, нижний размер которого составлял 10 м, верхний — 6 м (далее — минимальная фильтрация $10 \times 6 \times 3,5$), с последующим его полуторным (средняя фильтрация $15 \times 8 \times 4$) и практически двукратным увеличением (максимальная фильтрация $20 \times 10 \times 5$) (рис. 1, б). Следует отметить, что канал пересекал сооружение по нормали на нижней границе сооружения с геологическим основанием, при этом его вертикальный размер во всех рассмотренных вариантах не превышал $1/4$ высоты сооружения.

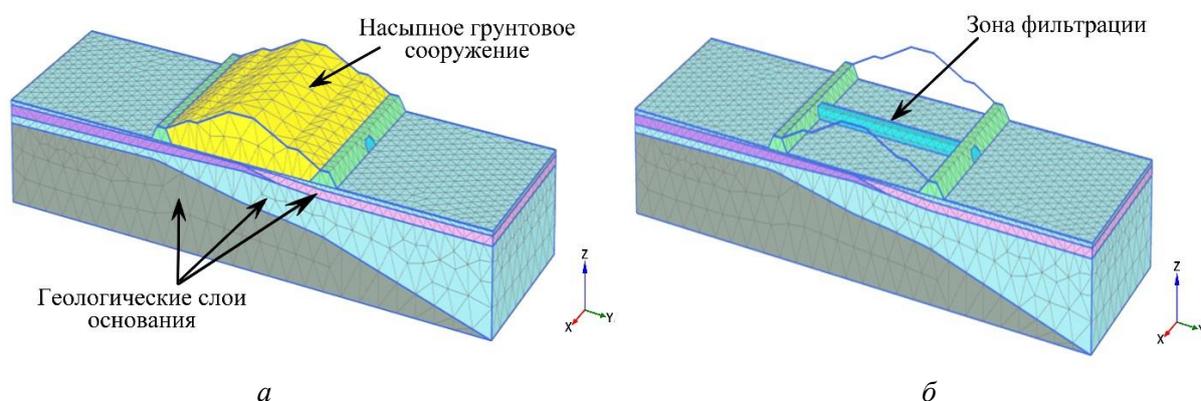


Рис. 1. Компьютерная 3D-модель фрагмента насыпного грунтового сооружения: а — геологическое строение и свойства грунтов; б — формирование зоны повышенной фильтрации

Fig. 1. Computer 3D model of a fragment of a soil bulk dam: а — geological structure and properties of soils; б — formation of high filtration zone

Выполнено многовариантное компьютерное моделирование гидрогеомеханического состояния с учетом уровня воды на верховом откосе (минимальный, средний, максимальный) и влияющих внешних и внутренних факторов. Внешними факторами являлись уровни воды на момент экспериментальных георадарных исследований, а также среднего и максимального его поднятия. В качестве внутренних влияющих факторов были исследованы изменения значений сцепления и угла внутреннего трения грунтов, а также скорости фильтрации воды в заданном канале.

Результаты моделирования

Компьютерное исследование гидрогеомеханического состояния насыпного грунтового сооружения выполнено с учетом параметрического влияния свойств грунтов и

гидродинамических характеристик, формирующихся фильтрационно-деформационных процессов на надежность насыпного грунтового сооружения. Для этих целей в программном комплексе PLAXIS 3D были проведены следующие типы расчетов для 34 вариантов параметрического сочетания: гравитационное нагружение, пластическое деформирование, совместный фильтрационно-деформационный расчет, оценка надежности.

На основе многовариантных расчетов выявлены особенности фильтрационно-деформационного состояния насыпного грунтового сооружения, заключающиеся в интенсивном развитии смещений слагающих его грунтов в приповерхностной части гребня с локализацией по оси формирующейся зоны повышенной фильтрации (рис. 2, *а*, красный цвет). Развитие зоны повышенной фильтрации от минимальной к максимальной создает все предпосылки для образования на данном участке сооружения механического размыва (прорана) (рис. 2, *б*).

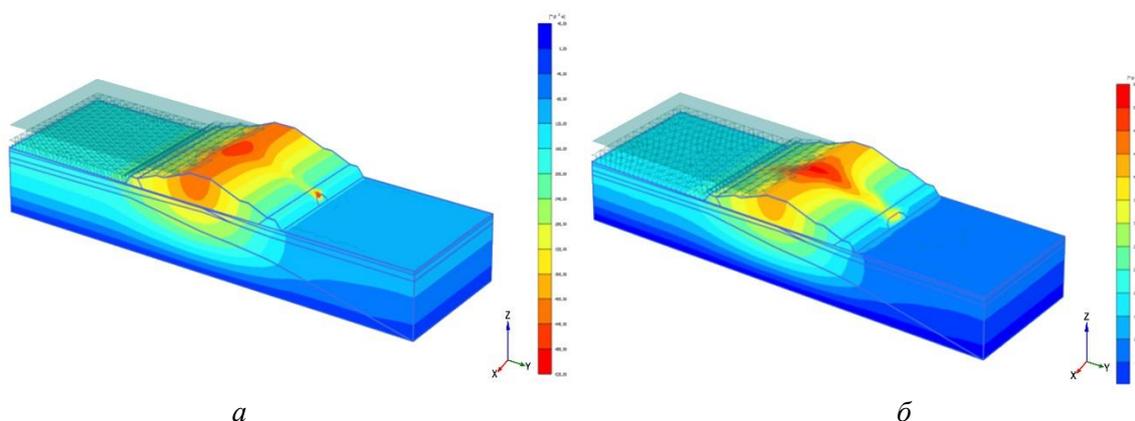


Рис. 2. Палитры фильтрационно-деформационного состояния фрагмента насыпного грунтового сооружения при минимальном (*а*) и максимальном (*б*) размерах зоны фильтрации

Fig. 2. Palettes of filtrational and deformation condition of a bulk soil dam fragment with minimum (*a*) and maximum (*b*) sizes of filtration zone

Во всех вариантах гидрогеомеханического компьютерного моделирования исследовалось параметрическое влияние основных деформационных свойств грунтов сооружения: сцепления C и угла внутреннего трения φ . На первом этапе, при прочих равных условиях, задавалось изменение значений сцепления C от 1 до 10. Коэффициент надежности рассчитывался для трех вариантов рассматриваемых размеров зоны и соответствующей фильтрации: минимальной, средней и максимальной (рис. 3, *а*).

На втором этапе выполнен анализ зависимости коэффициента надежности сооружения от угла внутреннего трения грунтов φ . Для этого, при прочих равных условиях, задавалось изменение φ от 10 до 43. Коэффициент надежности сооружения также рассчитывался для трех вариантов размеров зоны фильтрации: минимальной, средней и максимальной (рис. 3, *б*).

Обсуждение результатов

Анализ рассчитанных значений коэффициента надежности в зависимости от сцепления C грунтов сооружения позволяет сделать следующие выводы. При минимальной фильтрации снижение сцепления приводит к незначительному уменьшению коэффициента надежности. Для средней фильтрации снижение сцепления до 5 и ниже обуславливает значения коэффициента надежности менее 1, с последующим пропорциональным снижением. В случае с максимальной фильтрацией только значение сцепления C , равное 10, обеспечивает коэффициент надежности чуть выше 1. Для этого случая уменьшение сцепления приводит к соответствующему снижению надежности сооружения вплоть до значения 0,64.

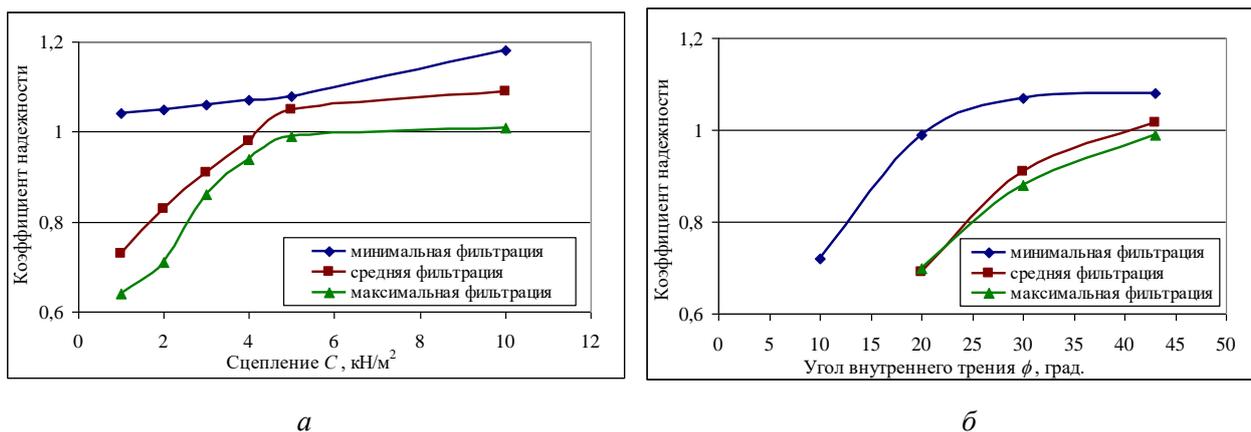


Рис. 3. Зависимость надежности насыпного грунтового сооружения от сцепления (а) и от угла внутреннего трения (б) слагающих ее грунтов

Fig. 3. Dependence of reliability of a bulk soil dam on coupling (a) and angle of internal friction (б) of the composing soil

Анализ рассчитанных значений коэффициента надежности в зависимости от угла внутреннего трения грунтов φ позволяет сделать следующие выводы. При минимальной фильтрации снижение угла внутреннего трения приводит к уменьшению коэффициента надежности, при $\varphi \leq 20$ коэффициент надежности становится меньше 1. Для средней фильтрации снижение угла внутреннего трения до 30 и ниже обуславливает значения коэффициента надежности менее 1 с последующим пропорциональным снижением. В случае с максимальной фильтрацией даже принятое максимальное значение угла внутреннего трения $\varphi = 43$ не обеспечивает надежности выше 1. Для этого случая снижение угла внутреннего трения приводит к соответствующему снижению надежности вплоть до значения 0,69.

Заключение

На основе результатов многовариантного параметрического моделирования насыпного грунтового сооружения установлены особенности влияния геометрических и гидродинамических характеристик формирующейся в его теле зоны повышенной фильтрации на надежность сооружения. Выявлены модельные зависимости надежности сооружения от обусловленной протечкой изменчивости основных деформационных свойств (параметров сцепления и угла внутреннего трения) грунтов в контурах зоны при различной степени фильтрационных процессов. Установлены граничные значения сцепления $C \leq 5$ и угла внутреннего трения $\varphi \leq 20$ грунтов в зоне повышенной фильтрации, при которых для рассматриваемых условий надежность сооружения не обеспечивается. Полученные данные предоставляют основу для оценки надежности насыпного грунтового сооружения при выявлении георадарными и сейсмотомографическими наблюдениями зоны повышенной фильтрации на ранних стадиях ее формирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2017 году. 2018. 165 с. URL: https://gov-murman.ru/upload/iblock/665/Doklad_zh-2017-god.pdf (дата обращения: 05.10.2018).
2. О безопасности гидротехнических сооружений: федер. закон от 23 июня 1997 г. № 117-ФЗ.
3. Строительные нормы и правила Российской Федерации «Гидротехнические сооружения. Основные положения» СНиП 33-01-2003. Ввод в действие с 01.01.2004. М., 2004. 30 с.
4. *Абрамов В. В.* Проблемы защиты окружающей среды. 2010. URL: http://secandsafe.ru/pravovaya_baza/blogi/ekologicheskaya_bezопасnost/problemy_zaschity_okrujayushey_prirodnoy_sredy_v_rossii (дата обращения: 05.10.2018).
5. *Айрапетян Р. А.* Причины аварий и повреждений плотин и их предупреждение. 1975. URL: <http://engineeringsystems.ru/proektirovanie-kamlenno-zemljanih-plotin/prichiny-avariy.php> (дата обращения: 05.10.2018).
6. *Максимов Д. А., Калашник А. И.* Экономические тенденции изысканий и мониторинга накопителей жидких горнопромышленных отходов в арктической зоне для целей декларирования их промышленной безопасности // Север и рынок. 2018. № 1 (57). С. 74–85.
7. Применение

современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря / Н. Н. Мельников [и др.] // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1. С. 13–20. **8.** Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа / А. А. Данилкин [и др.] // ГИАБ. 2014. № 7. С. 344–351. **9.** Калашник А. И., Запорожец Д. В., Калашник Н. А. Идентификация фильтрационно-деформационных процессов в теле ограждающей дамбы хвостохранилища // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 2 (5). С. 13–16. **10.** Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В. Исследование состояния насыпного гидротехнического сооружения на моренном основании // Ученые записки ПетрГУ. Серия: Естественные и технические науки. 2014. № 6 (143). С. 92–98. **11.** Калашник А. И., Калашник Н. А. Исследования ограждающего насыпного гидротехнического сооружения как прототипа дамбы хвостохранилища горно-обогатительного предприятия // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 1 (5). С. 27–30.

Сведения об авторе

Калашник Надежда Анатольевна — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: nadezhda-kalashnik28@rambler.ru

Author Affiliation

Nadezhda A. Kalashnik — Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: nadezhda-kalashnik28@rambler.ru

Библиографическое описание статьи

Калашник, Н. А. Оценка надежности насыпного грунтового сооружения при образовании в его теле зоны повышенной фильтрации / Н. А. Калашник // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 69–74.

Reference

Kalashnik Nadezhda A. Assessment of Reliability of a Bulk Soil Dam during Formation of an Increased Filtration Zone in Its Body. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 69–74. (In Russ.).

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ОСВОЕНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ НЕДР

В. М. Бусырев

ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

Определен круг ключевых задач рационального недропользования, необходимость их решения с привлечением стоимости расходуемых запасов минерального сырья. Приведены методы определения стоимости запасов, оценки эффективности эксплуатации месторождений, обоснование экономически приемлемых потерь запасов недр при добыче и переработке добытой руды, распределения дохода с обеспечением сбалансированности экономических интересов государства и недропользователей на объективной основе. Приведены примеры применения предложенных методов.

Ключевые слова:

рациональное, экономически сбалансированное недропользование, методы решения.

ECONOMIC BASES OF EFFICIENT USE OF SUBSOIL MINERAL RESOURCES

Vladislav M. Busyrev

Mining Institute of KSC RAS, Apatity, Russia

Abstract

The paper identifies a range of key tasks of efficient subsoil use and the need to solve them with the involvement of the cost of consumable mineral reserves. Methods are given for determining the value of reserves; assessing the deposit exploitation efficiency; justifying economically acceptable losses of subsoil reserves in the extraction and processing of mined ore; and for distributing income to ensure balanced economic interests of the state and subsoil users on an objective basis. The paper gives examples of the application of the proposed methods.

Keywords:

efficient and economically balanced subsoil use, solution methods.



Введение

Опыт и прогнозы на будущее свидетельствуют о лидирующей роли минерально-сырьевых ресурсов в развитии мировой экономики. За прошлое столетие добыча полезных ископаемых выросла с 7 до 280 млрд т/год, или в 40 раз. По прогнозам (XXXI Сессия Международного геологического конгресса Рио-де-Жанейро, 2000 г.), к 2050 г. ожидается ее увеличение до 1400 млрд т/год, или в 5 раз. В настоящее время извлекаемые из недр полезные ископаемые дают материальную и энергетическую основу производства более 70 % всей номенклатуры мировой продукции. В СССР добыча полезных ископаемых достигала четверти мирового объема. В настоящее время в России добывается шестая часть при численности населения 3 %. Поэтому экономическая и геополитическая позиция России в мире будет в значительной мере определяться количеством запасов минерально-сырьевых ресурсов в недрах и эффективностью их освоения.

Для состояния освоения минерально-сырьевых ресурсов недр характерны следующие ситуации. До настоящего времени сохраняется неполнота использования запасов эксплуатируемых месторождений. По сведениям ЦКР-ТПИ «Роснедра» [1, 2], в горнорудной промышленности при добыче теряется в недрах в среднем от 3 до 25 %, при обогащении добытой руды — от 3 до 55 % минерального сырья. Значительные потери требуют соответствующего восполнения минерально-сырьевой базы, причем, как показывает мировой опыт, темпами,

в 1,5–2 раза опережающими добычу. Однако в России в настоящее время восполнение расходуемых запасов существенно отстает, как это видно на примере имеющей развитую горную промышленность Мурманской обл. (табл. 1). Такое положение в недропользовании, как отмечено вторым съездом горнопромышленников [3], вызывает опасение видных специалистов [4, 5]. Существующая ситуация, возникшая из-за неполноты использования и восполнения минерально-сырьевой базы, для России усугубляется возрастающей труднодоступностью минерально-сырьевых ресурсов недр, отмеченной во всем мире экспертами ООН, ведущей к росту затрат на поисково-разведочные и эксплуатационные работы.

Таблица 1

Table 1

Добыча и прирост запасов полезных ископаемых Мурманской обл. в 1996–2010 гг.
Production and increase in mineral reserves of the Murmansk region (1996–2010)

Показатель Indicators	Железные руды Iron ore	Медно-никелевые руды Copper-nickel ore	Апатитовые руды Apatite ore
Добыча, млн т Production, mln t	149	56	253
Прирост запасов Increase in reserves			
млн т / mln t	40,9	4	16
%	32	7	7

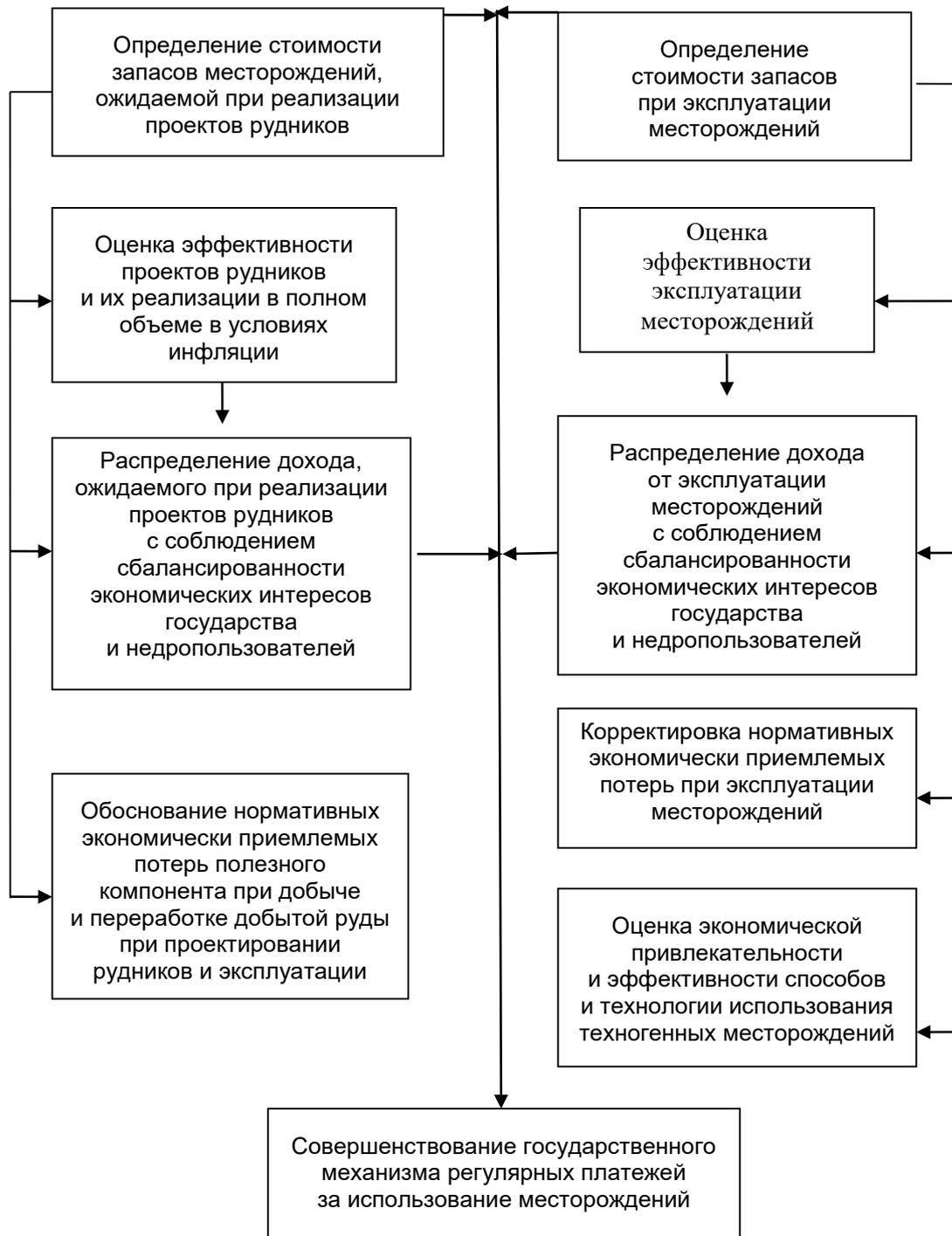
Ввиду особо значимой роли минерально-сырьевых ресурсов в развитии экономики право собственника на ресурсы недр во всех странах перешло государству. В России оно закреплено Конституцией, а их пользование, согласно Закону РФ «О недрах» (ст. 9), не ставится в зависимость от формы собственности недропользования. Наличие собственника запасов недр, естественно, ставит вопрос об оплате недропользователями расходуемых ими запасов эксплуатируемых месторождений. С переходом России к рыночным отношениям обострилась существовавшая и ранее некоторая противоречивость экономических интересов государства — владельца недр и недропользователей — частных собственников. Государство заинтересовано не только в эффективном, но и в более полном и комплексном освоении месторождений, тогда как недропользователи — в основном в более выгодных для себя экономических результатах эксплуатации месторождений. Существующая налоговая система [6] регулярных платежей за использование месторождений не может обеспечить соблюдение интересов владельца и пользователей недр на объективной основе, поскольку не способна учитывать расходуемые запасы месторождений. На необходимость совершенствования государственного механизма платы за пользование запасами недр указывалось видными учеными неоднократно.

Основные результаты

Горным институтом КНЦ РАН предложены концепция привлечения стоимости запасов месторождений к соблюдению сбалансированности интересов государства и недропользователей и методы решения задач рационального использования минерально-сырьевой базы страны на объективной экономической основе [7–12]. Рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов недр связано с решением комплекса десяти основных задач (рис.). Среди них ключевой задачей является определение стоимости запасов, расходуемых при эксплуатации месторождений.

Согласно концепции, привлечение стоимости запасов полезных ископаемых к решению задач рационального недропользования одновременно означает признание их товаром, используемым и оплачиваемым недропользователями как исходное сырье для производства

своей товарной продукции. Вместе с тем при определении стоимости расходуемых запасов месторождений следует учитывать особенности их происхождения. Действительно, полезные ископаемые образовались и продолжают образовываться благодаря происходящим в недрах процессам, от которых зависит где, какие, в каком количестве, какого качества, в какой природной среде образуются полезные ископаемые. На этом функции природных процессов заканчиваются. Ответы на эти вопросы дают результаты человеческой деятельности, направленной на поиск месторождений полезных ископаемых, их изучение и формирование минерально-сырьевой базы страны.



Блок-схема ключевых задач рационального освоения месторождений
Block-scheme of the key tasks of efficient mineral deposit development

При определении стоимости запасов месторождений важно выделить доли, в ней относящиеся как к природным процессам, так и к труду человека. Это позволит не только численно оценить в денежном измерении роль природных процессов и овеществленного труда человека, но и учитывать их при решении конкретных задач рационального недропользования, включая выбор рациональной технологии эксплуатации месторождений и соблюдение сбалансированного распределения дохода. Для определения доли овеществленного труда человека, затраченного на поисковые и геолого-разведочные работы, используется принятый в экономике принцип, предусматривающий возможность возмещения из дохода понесенных затрат и прибыли, приходящейся на них по принятым в экономике ставкам. Доля природных процессов в стоимости запасов, израсходованных недропользователями на производство своей товарной продукции, может быть определена по остатку дохода после исключения из него доли овеществленного труда человека как на поиск и разведку, так и на эксплуатацию месторождений. Эта доля представляет собой сверхприбыль при благоприятных природных условиях освоения месторождения, либо ущерб — при неблагоприятных.

Стоимость 1 т запасов полезного компонента с выделением долей природных процессов и овеществленного труда человека:

$$C_n = C_p (1 + K_{\text{Пр}}) + \frac{\Delta\text{Пр}}{Бс}, \quad (1)$$

где C_p — затраты на поисковые и геолого-разведочные работы, приходящиеся на 1 т разведанных запасов полезного компонента; $K_{\text{Пр}}$ — ставка прибыли на затраты, принятая в экономике; $Б$ — запасы полезного ископаемого; $с$ — содержание полезного компонента в запасах; $\Delta\text{Пр}$ — сверхприбыль/ущерб, зависит от состояния природных условий освоения месторождения:

$$\Delta\text{Пр} = D_k C_o (1 - 0,01N) - D_k C_k (1 + K_{\text{Пр}}) - БсC_p (1 + K_{\text{Пр}}), \quad (2)$$

где D_k — товарная продукция; C_o — цена товарной продукции; N — сумма налоговых ставок на доход за исключением налога на добытую руду; C_k — себестоимость товарной продукции.

Исследованиями Горного института КНЦ РАН на примере месторождений Кольского региона установлена [11] адекватность реагирования стоимости запасов полезных компонентов на изменение горно-геологических условий эксплуатации. Этим подтверждается сохранение приоритетной роли прибыли как показателя оценки эффективности освоения месторождений в случае привлечения стоимости запасов.

Полная прибыль от эксплуатации месторождения представляет собой, во-первых, долю, приходящуюся на труд человека, затраченный на геолого-разведочные работы и эксплуатацию месторождения, во-вторых, сверхприбыль либо ущерб, зависящие от горно-геологических условий месторождения, состояние которых полностью определено природными процессами, происходившими в недрах:

$$\text{Пр} = D_k C_k K_{\text{Пр}} + БсC_p K_{\text{Пр}} + \Delta\text{Пр}. \quad (3)$$

Полная прибыль от эксплуатации месторождения может быть определена по остатку дохода от реализации товарной продукции, полученной горным предприятием, после уплаты всех налогов (кроме существующего налога на добытую руду), возмещения затрат на поиск, разведку и эксплуатацию месторождения:

$$\text{Пр} = D_k C_o (1 - 0,01N) - D_k C_k - БсC_p. \quad (4)$$

Для более объективного представления о роли владельца недр — государства и недропользователей желательно выяснить их доли в полученной полной прибыли при эксплуатации месторождения.

Прибыль, приходящаяся на долю недропользователя:

$$\text{Пр}_r = D_k C_o (1 - 0,01N) - D_k C_k - БсC_n, \quad (5)$$

или

$$\text{Пр}_r = D_k C_k K_{\text{Пр}}.$$

Прибыль, приходящаяся на долю государства:

$$\text{Пр}_b = D_k C_o (1 - 0,01H) - D_k C_k (1 + K_{\text{Пр}}) - BcC_p, \quad (6)$$

или

$$\text{Пр}_b = BcC_p K_{\text{Пр}} + \Delta \text{Пр}.$$

Как видно, привлечение стоимости запасов минерального сырья, расходуемого на производство продукции недропользователей, позволяет выяснить и оценить участие природных факторов и труда человека в прибыли, полученной при эксплуатации месторождений. Это позволяет, во-первых, глубже и более объективно оценивать экономические результаты эксплуатации месторождений, во-вторых, способствует принятию наиболее экономически выгодных инженерных решений.

Выбор экономически выгодного варианта эксплуатации месторождения одновременно дает основание принять соответствующие ему потери при добыче и обогащении руды как экономически приемлемые.

Привлечение стоимости запасов позволяет решить задачу распределения дохода на объективной экономической основе с соблюдением сбалансированности интересов государства и недропользователей.

Доля дохода государства как владельца недр:

$$A_b = D_k C_o \cdot 0,01H + BcC_n. \quad (7)$$

Доля дохода недропользователя:

$$A_r = D_k C_o (1 - 0,01H) - BcC_n. \quad (8)$$

Как видно из приведенных формул, привлечение стоимости запасов месторождений позволяет государству контролировать выборочную отработку месторождений, запрещенную в настоящее время Законом РФ «О недрах». При неблагоприятных горно-геологических условиях и отрицательной величине стоимости запасов эксплуатация месторождения недропользователю не выгодна, а если это государству необходимо, оно должно, как это следует из формул (7) и (8), возместить недропользователю его ущерб, равный абсолютной величине стоимости запасов. С привлечением стоимости запасов предложены также методы оценки проектов рудников и освоения техногенных месторождений [7, 8, 12].

Информация, необходимая для оценки эффективности эксплуатации месторождений, имеется на горных предприятиях и регулярно ими контролируется.

Ниже, на примере Ковдорского флогопитового месторождения (табл. 2), отличающегося изменчивостью содержания слюды в его запасах, приведены результаты оценки эффективности и распределения дохода при эксплуатации участков с содержанием флогопита, равным среднему для месторождения (вариант 1), выше среднего (вариант 2) и на уровне бортового (вариант 3).

Как видно, при одинаковом выпуске товарной продукции и, следовательно, доходе эксплуатация участка с высоким содержанием флогопита обеспечивает наибольшую прибыль за счет снижения затрат на производство товарной продукции. Вместе с тем, благоприятные природные условия освоения месторождения, обуславливают рост сверхприбыли, а значит, и увеличение стоимости запасов участка. Вследствие этого государство, как владелец недр, получает более высокую долю прибыли и соответственно дохода. На участке с предельно низким содержанием слюды (вариант 3) стоимость его запасов отличается отрицательной величиной. Это

свидетельствует о том, что эксплуатация участка не выгодна ни государству, ни недропользователю. Она может вестись только в том случае, если это минеральное сырье необходимо государству и оно готово взять на себя возмещение ущерба в пользу недропользователя. В этом случае недропользователь получает возможность полностью возместить понесенные им затраты на эксплуатацию и получить на них прибыль, соответствующую ставкам прибыли на затраты, принятые в экономике в данное время.

Таблица 2
Table 2

Оценка эффективности вариантов эксплуатации Ковдорского флогопитового месторождения
Evaluation of the effectiveness of operating options for the Kovdor phlogopite deposit

Показатели Indicators	Вариант 1 Variant 1	Вариант 2 Variant 2	Вариант 3 Variant 3
1	2	3	4
Исходные данные / Initial data			
Содержание флогопита в запасах (с), кг/м ³ Phlogopite content in reserves (c), kg/m ³	200	250	50
Товарная продукция (D _к), т Marketable products (D _к), t	50000	50000	50000
Цена товарной продукции (C _о), руб/т Cost of marketable production (C _о), rub/t	2500	2500	2500
Себестоимость товарной продукции (C _к), руб/т Self-cost of marketable production (C _к), rub/t	1250	1050	2200
Затраты на разведку 1 т флогопита (C _р), руб/т Expenditures for exploration of 1 t of phlogopite (C _р), rub/t	400	400	500
Потери флогопита в процессе добычи и переработки добытой руды (п _з), доли ед. Phlogopite losses during production and processing (p _z), fr. unit	0,3	0,3	0,3
Ставка прибыли на затраты (K _{пр}), доли ед. Profit rate for expenditures (K _{пр}), fr. unit	0,1	0,1	0,1
Ставка налогов на доходы (Н), % Tax rate for profits (T), %	10	10	10
Результаты / Results			
Расход запасов полезного ископаемого (Б), тыс. м ³ Consumption of reserves (B), thousand m ³	357,1	285,7	1429
Расход запасов флогопита (Бс), т Consumption of phlogopite reserves (Bc), t	71429	71429	71429
Стоимость израсходованных запасов флогопита (БсC _н), тыс. руб. Cost of consumed phlogopite reserves (BcC _н), thousand roubles	43786	54786	-8500
Сверхприбыль либо ущерб от природных условий (ΔПр), тыс. руб. Superprofit or damage from natural conditions (ΔP), thousand roubles	12321	23321	-47786
Прибыль всего (Пр), тыс. руб. Overall profit (P), thousand roubles	21428	31428	-33214
Прибыль горного предприятия (Пр _г), тыс. руб. Profit of a mining company (P _м), thousand roubles	6250	5250	11000

Окончание таблицы 2
Table 2 (Continued)

1	2	3	4
Прибыль государства (Pr_b), тыс. руб. State profit (P_s), thousand roubles	15178	26178	-44214
Доля дохода горного предприятия (A_r), тыс. руб. Revenue share of a mining enterprise (A_m), thousand roubles	68714	57714	121000
Доля дохода государства (A_b), тыс. руб. Revenue share of the state (A_s), thousand roubles	56286	67286	4000

Заключение

В настоящее время и обозримом будущем развитие экономики России во многом определяется состоянием и использованием минерально-сырьевых ресурсов недр. Опыт свидетельствует о росте потребления минерально-сырьевых ресурсов недр, их труднодоступности и увеличении затрат на освоение месторождений, неполноте использования запасов сырья, некоторой противоречивости экономических интересов государства и недропользователей в вопросах эффективного и бережливого использования минерально-сырьевых ресурсов страны, а также указывает на несовершенство налогового механизма регулярных платежей за использование месторождений, не учитывающего расходы их запасов горными предприятиями. Поэтому проблема рационального недропользования остается актуальной и требует своего решения на более совершенной экономической основе. Существующий до сих пор подход к экономическому обоснованию принимаемых и используемых инженерных решений, регулированию правовых отношений между государством и недропользователями без учета стоимости расходуемых запасов полезных ископаемых последними на производство своей товарной продукции исключает возможность решения проблемы рационального использования месторождений. Единственный выход из существующей ситуации заключается в сохранении за государством права собственности на недра и в решении задач недропользования с привлечением стоимости расходуемых запасов к созданию объективной экономической основы для соблюдения сбалансированности экономических интересов сторон.

Для реализации стратегии рационального использования минерально-сырьевых ресурсов страны первоочередной задачей является определение стоимости запасов месторождений. Предложенный метод определения стоимости впервые позволяет выделить ее доли, относящиеся к природным процессам, благодаря которым полезные компоненты произошли в недрах Земли, а также выделить долю стоимости, относящуюся к овеществленному труду человека, затраченному на поиск, изучение и формирование источников минерально-сырьевой базы страны. Это свойство предложенного метода впервые позволяет решать последующие задачи с соблюдением сбалансированности экономических интересов сторон. Разработанные с привлечением стоимости запасов недр методы оценки проектов рудников, эксплуатации месторождений и использования техногенных отходов обеспечивают решение ключевых инженерных задач на объективной экономической основе. Необходимая для этого информация имеется в геолого-разведочных организациях и на горных предприятиях, но полномасштабному и обязательному использованию методов может способствовать только переход государственного механизма на более прогрессивный способ экономических отношений государства и недропользователей, что потребует, учитывая связь с формированием госбюджета, проведения целенаправленных опытно-промышленных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баялов В. Н., Филиппов С. А., Ашихмин А. А. Анализ итогов работы ЦКР-ТПИ Роснедр за 2010 г. // Рациональное освоение недр. 2011. № 1. С. 3–7.
2. Воропаев В. И., Ашихмин А. А. Утверждение нормативов потерь полезных ископаемых при добыче как механизм государственного управления в сфере недропользования. Результаты анализа качества проектной и технической документации на разработку месторождений ТПИ (по итогам деятельности секции ТПИ ЦКР Роснедр) // Недропользование XXI век. 2010. № 2. С. 13–20.
3. Второй съезд горнопромышленников

России // Геологическое изучение недр и водопользование. 2002. № 12. С. 25–28. 4. Орлов В. П. Геологическое изучение недр: инерция или модернизация? // Недропользование — XXI век. 2012. № 6. С. 62–66. 5. Михайлов Б. К. Проблемы воспроизводства минерально-сырьевой базы ТПИ недр России за счет средств недропользователей // Рациональное освоение недр. 2012. № 4. С. 10–17. 6. Налоговый кодекс (НК РФ 2015). М., 2015. 7. Мельников Н. Н., Бусырев В. М. Экономические основы сбалансированного освоения минерально-сырьевой базы. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. 125 с. 8. Мельников Н. Н., Бусырев В. М. Метод оценки эффективности освоения техногенных месторождений // Изв. вузов. Горн. журн. 2016. № 7. С. 20–26. 9. Мельников Н. Н., Бусырев В. М. Основы рационального недропользования // Изв. вузов. Горн. журн. 2017. № 7. С. 43–49. 10. Melnikov N. N., Busyrev V. M. Rational use of subsoil mineral resources // Изв. вузов. Горн. журн. 2018. № 7. С. 75–84. 11. Мельников Н. Н., Бусырев В. М. Стоимость запасов месторождений и ее зависимость от природных факторов // Изв. вузов. Горн. журн. 2010. № 4. С. 10–18. 12. Мельников Н. Н., Бусырев В. М., Чуркин О. Е. Оценка стоимости запасов и эффективности использования техногенных месторождений // ГИАБ. 2018. № 8. С. 200–207.

Сведения об авторе

Бусырев Владислав Михайлович — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института ФИЦ КНЦ РАН

E-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Author Affiliation

Vladislav M. Busyrev — Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Библиографическое описание статьи

Бусырев, В. М. Экономические основы рационального освоения минерально-сырьевых ресурсов недр / *В. М. Бусырев* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 75–82.

Reference

Busyrev Vladislav M. Economic Bases of Efficient Use of Subsoil Mineral Resources. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 75–82. (In Russ.).

РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ГРАВИТАЦИОННО-ФЛОТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ МАЛОСУЛЬФИДНЫХ РУД КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

В. В. Марчевская, Т. Н. Мухина

ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

Месторождения малосульфидных платинометалльных руд Федорово-Панского интрузивного комплекса относятся к крупным месторождениям металлов платиновой группы. Ввод их в эксплуатацию совместно с более мелкими малосульфидными объектами Мончегорского рудного района позволит обеспечить около 20 % от общероссийской добычи платиновых металлов. Приведены результаты исследований, направленных на обоснование и разработку рациональной технологии обогащения тонкодисперсных малосульфидных платиносодержащих руд Кольского п-ова, обеспечивающей полноту извлечения ценных компонентов из руд. В связи с наличием в малосульфидных рудах Кольского п-ова тонкодисперсных минералов платиновых металлов и интерметаллических соединений золота, которые недостаточно полно извлекаются флотацией, выполнены исследования эффективности включения гравитационного обогащения в технологическую схему их переработки. Показано, что комбинированная гравитационно-флотационная технология обогащения тонкодисперсных малосульфидных руд при оптимальном размещении гравитационных аппаратов в цикле измельчения-классификации обеспечивает повышение извлечения платины — на 1,84 %, палладия — на 2,45 %, золота — на 8,8 %, а также снижение более чем на 20 % циркуляционной нагрузки в наиболее энергоемкой операции измельчения по сравнению с разработанной ранее флотационной технологией. Представлена технологическая схема комбинированной технологии обогащения малосульфидных платинометалльных руд.

Ключевые слова:

малосульфидные платинометалльные руды, минералы платиновых металлов (МПМ), металлы платиновой группы, флотация, гравитационное обогащение, качество концентрата, извлечение, технологическая схема.

DEVELOPMENT OF A RESOURCE-SAVING GRAVITY-FLOTATION BENEFICIATION TECHNOLOGY FOR FINE-DISPERSED LOW-SULPHIDE ORES OF THE KOLA PENINSULA

Valentina V. Marchevskaya, Tatyana N. Mukhina

Mining Institute of KSC RAS, Apatity, Russia

Abstract

The low-sulphide platinum-metal ores deposits of the Fedorov-Pansky intrusive complex belong to large platinum group metal deposits. Putting them into operation together with smaller low-sulphide deposits of the Monchegorsk ore district will provide about 20 % of the all-Russian production of platinum metals. The article presents the research results aimed at substantiating and developing a rational beneficiation technology for fine-dispersed low-sulphide platinum-containing ores of the Kola Peninsula, which ensures the complete extraction of valuable components. Fine-dispersed minerals of platinum metals and intermetallic gold compounds in low-sulphide ores of the Kola Peninsula are not fully recovered by flotation; for this reason studies have been conducted on the effectiveness of involving the gravity beneficiation into a technological processing flowsheet. It has been shown that the combined gravity-flotation beneficiation technology for fine-dispersed low-sulphide ores, with the optimal placement of gravity devices in the grinding-classification cycle, provides an increase in platinum recovery by 1,84 %, palladium by 2,45 %, and gold by 8,8 %, as well as reduces the circulating load in the most energy-intensive grinding operation by more than 20 % compared with the previously developed flotation technology. The paper presents equipment flowsheet of the combined beneficiation technology for low-sulphide platinum metal ores.

Keywords:

low-sulphide platinum-metal ores, minerals of platinum metals, platinum group metals, flotation, gravity beneficiation, concentrate quality, recovery, flowsheet.



Введение

В Арктической зоне России сосредоточено около 19 % мировых запасов металлов платиновой группы (МПГ), а доля запасов платины и палладия составляет более 99 % от суммарных российских. 80 % мировых запасов платины находятся в магматическом комплексе Бушвелд в ЮАР. Второй страной по объемам запасов платины является Зимбабве (месторождение Великая Дайка), далее следуют Россия и Северная Америка (Канада и США). Потребление МПГ устойчиво опережает мировое производство, причем наибольшую динамику спроса за последнее время демонстрирует палладий. Рост потребления палладия и его цены, обеспеченность его запасами на длительный период определяют ключевую позицию России на мировом рынке [1–3].

В XX столетии в России основное производство металлов платиновой группы (до 90 %) было связано с переработкой богатых сульфидных медно-никелевых руд норильских месторождений, в которых МПГ были попутными продуктами для металлургии. В настоящее время в связи с истощением минерально-сырьевой базы доля запасов вкрапленных руд на этих месторождениях составляет 84 %. По экономическим оценкам отечественных и зарубежных специалистов, в XXI в. основное производство МПГ в России будет связано с добычей малосульфидных руд, ресурсы которых в Норильском районе оцениваются в тысячи тонн, в Кольском регионе — в сотни тонн [2, 4, 5].

Федорово-Панский расслоенный интрузивный комплекс и Мончегорский плутон являются важнейшими рудными узлами Кольской платинометалльной провинции. Месторождения Федорово-Панского интрузива относятся к крупным и уникальным месторождениям МПГ, а по критерию внутренней нормы доходности — к инвестиционно привлекательным. Они представляют наибольший интерес при возможном создании на Северо-Западе России новой минерально-сырьевой базы добычи и переработки платиносодержащих руд и сохранении уровня производства платиновых металлов в России. При условии их ввода в эксплуатацию совместно с другими, более мелкими малосульфидными объектами Мончегорского рудного района, в XXI в. они смогут обеспечить не менее 20 % от общероссийской добычи платиновых металлов [2, 6].

В связи с этим очевидна актуальность научно-исследовательских работ с целью совершенствования технологии обогащения малосульфидных платинометалльных руд Кольского п-ова.

Платинометалльное оруденение интрузивов Федорово-Панского расслоенного комплекса и Мончегорского плутона повсеместно пространственно и генетически связано с сульфидной медно-никелевой минерализацией. Более 80 % всех выявленных зерен размером более 20 мкм срastaются с сульфидами. Остальные относительно крупные зерна локализованы вблизи сульфидов в тонкозернистых реакционных ореолах силикатов. Основными формами концентрации ЭПГ в рудах месторождений этих интрузивов, как и на большинстве крупных малосульфидных месторождений мира, являются их собственные минералы (МПП) и твердые растворы палладия в пентландите, в котором сосредоточено 40–50 % валового палладия. По данным микронзондовых анализов, среднее содержание палладия в пентландите месторождения Федорова Тундра составляет 420 г/т, месторождения Киевей — 1800 г/т, месторождений Мончегорского плутона — 300–600 г/т [7–11].

Согласно тесной пространственно-генетической связи платиновых металлов с сульфидной минерализацией основным методом обогащения малосульфидных платинометалльных руд в России на обогатительных фабриках ПАО «ГМК Норильский никель», как и на зарубежных фабриках, является флотация с получением коллективных сульфидных благороднометаллических

концентратов. Флотация включает основную и контрольную операции и две-три перечистные чернового концентрата. В мировой практике при обогащении благороднометалльных руд для повышения извлечения благородных металлов, помимо флотационного, реализуют гравитационное выделение концентратов ценных металлов, причем при разделении тонкодисперсных продуктов наиболее широко используются различные центробежные аппараты [11–14].

Центробежные аппараты — концентраторы, отсадочные машины, шлюзы — по сравнению с другими гравитационными обеспечивают высокие показатели извлечения тонкодисперсных минеральных частиц высокой плотности. Применение центробежных концентраторов, позволяющих получать концентраты высокого качества, наиболее перспективно для извлечения благородных металлов из лежалых хвостов, для обогащения бедных руд, а также в схемах действующих обогатительных фабрик. Так, на обогатительных фабриках ЗФ ПАО «Норильский никель» для наиболее полного извлечения платиновых металлов при обогащении вкрапленных и малосульфидных руд в схемах гравитационно-флотационного и флотационно-гравитационного обогащения используются центробежные концентраторы Knelson [14–16].

Первые исследования гравитационного обогащения малосульфидных руд Федорово-Панского массива выполнены сотрудниками ЗАО «Механобр Инжиниринг» с использованием двух вариантов гравитационно-флотационной технологии. В первом варианте технологическая схема предусматривает первоначальное обогащение всего потока руды, измельченной до –1 мм, при ее классификации по крупности 0,5 мм на концентрационных столах с получением гравитационного концентрата, и флотационное обогащение доизмельченных до 80–85 % класса –74 мкм гравитационных хвостов. По второму варианту вся руда измельчалась до указанной флотационной крупности, обогащалась на концентрационном столе, а хвосты гравитации флотировались. По результатам исследований, проведенных на материале пяти малообъемных проб малосульфидных руд, содержащих 0,14–0,21 % никеля, 0,30–0,36 % меди, 0,3–0,9 г/т платины, 2,0–6,0 г/т палладия, 0,05–0,15 г/т родия, 0,1–0,3 г/т золота, установлена возможность получения общего гравитационно-флотационного концентрата, содержащего до 2 % никеля, 6,5 % меди, 13,6 г/т платины, 71,4 г/т палладия, 1,4 г/т родия, 2,8 г/т золота при их максимальном извлечении 73, 88, 94, 65, 75 и 78 % соответственно [17].

Следует отметить, что при обогащении богатых малосульфидных руд авторами получены невысокие показатели как по качеству концентрата, содержащего менее 100 г/т благородных металлов и не более 2 % никеля, так и по извлечению в него ценных металлов.

Для гравитационного извлечения платиновых металлов и золота из малосульфидных платинометаллических руд Федорово-Панского массива и Мончегорского плутона центробежные концентраторы являются наиболее приемлемыми аппаратами, поскольку нижний предел крупности зерен МПП, позволяющий получить их удовлетворительное извлечение на традиционных гравитационных аппаратах (гидроциклонах, отсадочных машинах и концентрационных столах), составляет не менее 50 мкм, на шламовых концентрационных столах — до 30 мкм [16]. В малосульфидных рудах Федорово-Панского комплекса МПМ крупнее 50 мкм содержится всего 18 %, крупнее 30 мкм — 33 % [7, 18].

В современных условиях, особенно в период экономических кризисов, разработка и совершенствование методов извлечения тонкодисперсных частиц цветных и благородных металлов с использованием комбинированных процессов является одним из важнейших направлений развития методов комплексной переработки минерального сырья сложного состава, основанных на фундаментальных исследованиях процессов раскрытия и разделения полиминеральных комплексов [19].

Методика исследований

В связи с наличием в малосульфидных рудах Кольского п-ова тонкодисперсных платинометаллических минералов и интерметаллических соединений золота, которые недостаточно полно извлекаются флотацией, выполнены исследования эффективности включения

гравитационного разделения в технологическую схему обогащения малосульфидных руд. Исследования проведены на материале тонкодисперсных руд технологической пробы № MS-2 месторождения Киевей с высоким соотношением благородных и цветных металлов.

Дробление руды выполнялось на лабораторном оборудовании — щековой и валковой дробилках с соблюдением стадийности дробления и предварительного отсева класса готовой продукции. Измельчение руды осуществлялось в лабораторной шаровой мельнице 40 МЛ объемом 7 л при параметрах Т:Ж:Ш = 1:0,6:7. Минеральный состав проб малосульфидных руд определен с использованием порошкового рентгеновского дифрактометра D2 PHASER производства компании Bruker AXS GmbH (Германия).

Массовая доля благородных металлов определена пробирно(Pb)-атомно-абсорбционным методом по СТП 1402.151.0-96, СТП 1402.151.1-96 (Au), массовая доля цветных металлов (никеля, меди) — по методике НСАМ № 155ХС, 352Х в Региональном аналитическом центре ЗАО «Механобр Инжиниринг Аналит» (г. Санкт-Петербург).

Исследована рациональность размещения гравитационных аппаратов для извлечения собственных форм минералов благородных металлов в трех точках технологической цепи: в «голове» схемы, в цикле измельчения-классификации и на конечном этапе схемы для доизвлечения благородных металлов из хвостов флотации.

В первых двух вариантах реализуется гравитационно-флотационная схема обогащения малосульфидных руд, в последнем — флотационно-гравитационная.

При реализации первого варианта в качестве гравитационного аппарата использовался концентрационный стол Holman-Wilfley, применяемый в практике обогащения золотосодержащих руд. В технологической схеме предусматривается первоначальное обогащение всего потока руды, измельченной до крупности 98 % класса –0,5 мм на концентрационном столе с получением гравитационного концентрата, и флотационное обогащение доизмельченных до 90 % класса –71 мкм гравитационных хвостов в открытом цикле.

Во втором и третьем вариантах в качестве гравитационного аппарата использовался центробежный концентратор с периодической разгрузкой Falcon модели SB40, способный с использованием высокого гравитационного поля извлекать ультратонкие частицы размером 10 мкм и менее.

По результатам проведенных исследований установлено, что руда крупнее 0,1 мм практически не обогащается в центробежном концентраторе, степень концентрации благородных металлов не превышает 2 в классе –0,2+0,16 мм и 3,5 в классе –0,16+0,10 мм, причем здесь наибольшая степень концентрации наблюдается для никеля и палладия, вероятно, за счет извлечения в концентрат небольшого количества наиболее крупных зерен или гнезд пентландита. Заметный рост степени концентрации всех полезных компонентов начинается в материале мельче 45 мкм, причем в мелких классах концентрат преимущественно обогащен золотом и платиной. Это обусловлено тем, что большая часть платины присутствует в руде в виде собственных минералов, а практически все золото — в виде золотосеребряных сплавов, обладающих значительно большей плотностью по сравнению с остальными минералами, что и приводит к большей степени их концентрации в процессе гравитационного обогащения в тонких классах крупности в соответствии с размерами их зерен. Большая часть палладия в малосульфидных рудах находится в виде твердых растворов в сульфидах, главным образом в пентландите, поэтому она и извлекается совместно с пентландитом, за исключением самого мелкого класса –25 мкм, в котором начинают концентрироваться мелкие зерна палладиевых минералов. С учетом полученных данных в центробежном концентраторе гравитационному обогащению подвергался материал крупностью менее 0,1 мм.

При реализации второго варианта гравитационно-флотационного обогащения руд — гравитационного обогащения песков гидроциклона — измельченная руда крупностью –0,4 мм поступала в гидроциклон, который разделял поток на пески и слив. Далее пески классифицировались по сетке 0,1 мм, выделенный надрешетный продукт поступал на доизмельчение. Подрешетный продукт грохота подавался на гравитационное обогащение в центробежный концентратор,

в котором выделялся гравитационный концентрат и хвосты. Концентратор работал в следующем режиме: нагрузка по питанию — 30 кг/ч; процент твердого — 35; центробежное поле — 200 м/с²; расход оживающей воды — 9,0 л/мин. Гравитационные хвосты совместно со сливом гидроциклона являлись питанием флотации, выполненной в замкнутом цикле.

Флотационно-гравитационная схема обогащения предусматривала процесс гравитационного доизвлечения благородных металлов из хвостов флотации в центробежном классификаторе. Целесообразность разработки способов извлечения платиновых металлов из хвостов обусловлена тем фактом, что при флотации удовлетворительно извлекаются минеральные зерна крупностью более 10 мкм, а в хвостах флотации руд пробы № MS-2 выход материала менее 10 мкм с содержащимися в нем тонкодисперсными минералами составляет более 20 %.

Флотационные хвосты были расклассифицированы по ячейке 0,1 мм. Выход класса +0,1 мм составил всего 2,87 %. В соответствии с результатами проведенных ранее исследований расчетное извлечение благородных металлов из этого класса составляет около 0,8 %. Гравитационное разделение выполнено на материале крупностью менее 0,1 мм, выход которого составил 97,13 %. Обогащение проводили в два цикла по следующей схеме: хвосты первого цикла выводились и составили гравитационные хвосты, а концентрат подавался в центробежный аппарат на пересортировку.

Концентратор работал в следующем режиме: нагрузка по питанию — около 30 кг/ч; процент твердого — 40; центробежное поле — 225 м/с²; расход оживающей воды — 15 л/мин.

Флотационные исследования выполнялись в лабораторных флотомашинах механического типа Denver-12 (объем камеры — 3,0 и 1,5 л) и 237 ФЛ-А (объем камеры — 0,75 и 0,5 л).

Результаты исследований

Материал технологической пробы № MS-2, характеризующий верхнее рудное тело месторождения Киевей, преимущественно представлен рудными среднезернистыми лейко-мезократовыми пятнистыми амфиболизированными габбро и среднезернистыми мезократовыми слабоизмененными габбро-норитами с незначительной примесью среднезернистых норитов и плагиопироксенитов.

Основными минералами рудовмещающих пород проб являются амфиболы, плагиоклазы, хлориты, минералы группы цоизита-эпидота, слюды, кварц, кальцит. Амфиболы представлены актинолитом, роговой обманкой, паргаситом и куммингтонитом, плагиоклазы — альбитом и лабрадором, хлориты — клинохлором. Слюды представлены биотитом и мелкочешуйчатой разновидностью мусковита, а также аннитом, пироксены — энстатитом и авгитом. В руде пробы имеются оливин и серпентины (лизардит, антигорит) (табл. 1).

Из платиновых минералов в руде пробы наиболее распространенными являются висмутотеллуриды и сульфиды палладия и платины: котульскит, меренскиит, мончеит, высокоцит, брэггит; в подчиненном количестве присутствуют арсениды платины и палладия сперрилит и стиллуотерит. Золото присутствует в виде золотосеребряных сплавов с высокими вариациями элементов.

Массовая доля ценных компонентов в руде технологической пробы № MS-2 составляет: 0,095 % никеля, 0,101 % меди, 0,49 г/т платины, 3,10 г/т палладия, 0,14 г/т золота, 3,73 г/т суммарного содержания благородных металлов.

Соотношение металлов в пробе составляет: меди и никеля — 1,1; палладия и платины — 6,3; благородных и цветных металлов [(Pt+Pd+Au), г/т] / [(Ni+Cu), %] — 19,0.

Вклад золота в сумму благородных металлов составляет всего 3,8 %.

При реализации первого варианта в результате гравитационного обогащения получен концентрат с выходом 0,87 %, содержащий 53,46 г/т суммарного количества благородных металлов, в т. ч. 5,28 г/т платины, 47,17 г/т палладия, 1,01 г/т золота. Содержание никеля в концентрате составило 1,28 %, меди — 1,03 %.

Таблица 1
Table 1

Минеральный состав малосульфидных руд по данным рентгенофазового анализа
The mineral composition of low-sulphide ores according to X-ray phase analysis

Минерал/mineral	Содержание/content, %	Минерал/mineral	Содержание/content, %
Пирротин, всего Pyrrhotite, overall	0,85	Плагиоклазы, всего Plagioclases, overall	44,56
Пирит Pyrite	0,28	Оливин Olivine	1,71
Пентландит Pentlandite	0,2	Серпентины, всего Serpentines, overall	0,61
Миллерит Millerite	0,04	Тальк Talc	0,56
Виоларит Violarite	0,03	Кварц Quartz	4,04
Халькопирит Chalcopyrite	0,33	Кальцит Calcite	0,45
Борнит Bornite	0,01	Клинохлор Clinochlore	0,82
Ковеллин Covellite	0,06	Цоизит Zoisite	4,8
Ильменит Ilmenite	0,41	Эпидот Epidote	4,19
Магнетит Magnetite	0,28	Слюды, всего Mica, overall	3,11
Пироксены, всего Pyroxenes, overall	11,18	Всего Total	100
Амфиболы, всего Amphiboles, overall	21,48		

Из гравитационных хвостов, содержащих 0,48 г/т платины, 2,94 г/т палладия, 0,14 г/т золота, 0,087 % никеля и 0,100 % меди, получен флотационный концентрат с выходом 0,94 % с массовой долей благородных металлов — 209,91 г/т, в т. ч. 38,4 г/т платины, 162 г/т палладия, 9,51 г/т золота; цветных металлов — 10,42 %, в т. ч. 3,42 % никеля, 7 % меди. Сравнительные показатели флотационного и гравитационно-флотационного обогащения руд пробы № MS-2 в открытом цикле при реализации гравитации в «голове» схемы приведены в табл. 2.

В сравнении с показателями флотационного обогащения руд пробы № MS-2 в открытом цикле показатели гравитационно-флотационного обогащения этих руд ниже. Общий гравитационно-флотационный концентрат содержит 22,48 г/т платины против 25,53 г/т, 106,81 г/т палладия (131,21 г/т), 5,42 г/т золота (6,88 г/т), 2,39 % никеля (3,25 %), 4,13 % меди (4,69 %). Несмотря на более высокий выход общего гравитационно-флотационного концентрата, извлечение в него всех ценных металлов, за исключением платины, тоже ниже.

Показатели гравитационно-флотационного обогащения руд при реализации гравитации песков гидроциклона в центробежном концентраторе Falcon SB40 выше показателей флотационного обогащения руд пробы № MS-2 в замкнутом цикле. Хотя общий гравитационно-флотационный концентрат содержит на 1 г/т меньше благородных металлов — 132,75 против 133,70 г/т за счет более низкой на 1,4 г/т в нем массовой доли палладия, однако массовая доля золота в нем выше на 1 г/т — 5,56 против 4,6 г/т при близком содержании платины 19,23 и 19,7 г/т соответственно. Сравнительные показатели флотационного и гравитационно-флотационного обогащения руд пробы № MS-2 в замкнутом цикле при реализации гравитации песков гидроциклона приведены в табл. 3.

Таблица 2
Table 2

Сравнительные показатели гравитационно-флотационного и флотационного обогащения малосульфидных благороднометаллических руд в открытом цикле

Comparative indicators of gravity-flotation and flotation beneficiation of low-sulphide noble metal ores in an open cycle

Наименование продукта Product	Выход, % Yield, %	Массовая доля компонента Mass fraction of component										Извлечение компонента, % Recovery of component, %																																						
		г/т / ppm-w					%					Pt	Pd	Au	PGE + Au	Ni	Cu																																	
		Pt	Pd	Au	PGE + Au	Ni	Cu	%	%	%	%																																							
Флотационная схема Flotation circuit																																																		
Концентрат Concentrate	1,51	25,53	131,21	6,88	163,62	3,25	4,69	77,78	64,33	70,09	66,35	50,56	70,92																																					
Промпродукт Intermediate	12,62	0,40	4,83	0,16	5,38	0,14	0,13	10,10	19,78	13,68	18,25	18,48	17,04																																					
Хвосты Tailings	85,87	0,07	0,57	0,03	0,67	0,035	0,014	12,13	15,89	16,22	15,40	30,96	12,04																																					
Руда Ore	100	0,50	3,08	0,15	3,72	0,097	0,100	100	100	100	100	100	100																																					
Гравитационно-флотационная схема (гравитация на концентрационном столе в «голове» схемы) Gravity-flotation flowsheet (gravity on concentration table in «head» of)																																																		
Концентрат гравитационный Gravity concentrate	0,87	5,28	47,17	1,01	53,46	1,28	1,03	8,82	12,35	5,83	11,64	11,37	9,23																																					
Концентрат флотационный Flotation concentrate	0,94	38,40	162,00	9,51	209,91	3,42	7,00	69,28	45,83	59,26	49,40	32,81	67,76																																					
Концентрат общий Concentrate total	1,81	22,48	106,81	5,42	134,71	2,39	4,13	78,10	58,18	65,09	61,04	44,18	76,99																																					
Промпродукт Intermediate	11,01	0,72	8,50	0,32	9,54	0,18	0,10	15,21	28,17	23,36	26,30	20,23	11,34																																					
Хвосты Tailings	87,18	0,04	0,52	0,02	0,58	0,040	0,013	6,69	13,65	11,56	12,66	35,59	11,67																																					
Руда Ore	100	0,52	3,32	0,15	3,99	0,098	0,097	100	100	100	100	100	100																																					

Таблица 3
Table 3

Сравнительные показатели гравитационно-флотационного и флотационного обогащения малосульфидных благороднометаллических руд в замкнутом цикле
Comparative indicators of gravity-flotation and flotation beneficiation of low-sulphide noble metal ores in a closed cycle

Наименование продукта Product	Выход, % Yield, %	Массовая доля компонента Mass fraction of the component								Извлечение компонента, % Recovery of component, %							
		г/т / ppm-w				%				Pt	Pd	Au	PGE+ Au	Ni	Cu		
		Pt	Pd	Au	PGE+ Au	Ni	Cu	Pt	Pd							Au	PGE+ Au
Флотационная схема Flotation circuit																	
Концентрат Concentrate	2,34	19,70	109,40	4,60	133,70	2,49	3,98	88,72	81,37	78,60	82,33	60,69	85,44				
Хвосты Tailings	97,66	0,06	0,60	0,03	0,69	0,039	0,016	11,28	18,63	21,40	17,67	39,31	14,56				
Руда Ore	100	0,52	3,14	0,14	3,80	0,096	0,109	100	100	100	100	100	100				
Гравитационно-флотационная схема (гравитация песков гидроциклона) Gravity-flotation circuit (gravity of hydrocyclone sands)																	
Концентрат гравитационный Gravity concentrate	0,46	59,25	94,87	9,05	163,17	1,20	0,47	52,72	13,92	26,87	19,71	5,65	2,01				
Концентрат флотационный Flotation concentrate	1,97	9,91	111,00	4,75	125,66	2,80	4,60	37,85	69,90	60,53	65,17	56,47	84,39				
Концентрат общий Concentrate total	2,43	19,23	107,95	5,56	132,75	2,50	3,82	90,56	83,82	87,40	84,88	62,13	86,40				
Хвосты Tailings	97,57	0,05	0,52	0,02	0,59	0,038	0,015	9,44	16,18	12,60	15,12	37,87	13,60				
Руда Ore	100	0,52	3,14	0,15	3,81	0,098	0,108	100	100	100	100	100	100				

Массовая доля никеля и меди в концентратах примерно одинаковая. При более высоком на 0,1 % абс. (3,8 % отн.) выходе общего гравитационно-флотационного концентрата извлечение в него суммы благородных металлов выше на 2,55 %, в том числе платины — на 1,84 %, палладия — на 2,45 %, золота — на 8,8 %.

Степень концентрации ценных металлов в гравитационный концентрат от операции составила: платины — 32,9, палладия — 13,2, золота — 63,3; от руды — 113,9, 30,2, 63,3 соответственно. Значительно более высокая степень концентрации платины и золота в гравитационных концентратах относительно флотационных, как отмечено выше, связана с преимущественной формой их нахождения в рудах в виде собственных минералов.

Включение гравитационного разделения расклассифицированных песков гидроциклона в технологическую схему обогащения руд позволяет эффективно извлекать собственные формы минералов благородных металлов, особенно платины и золота, а также более чем на 20 % снизить циркуляционную нагрузку в наиболее энергоемкой операции измельчения. Рекомендуемая схема цепи аппаратов гравитационно-флотационного обогащения малосульфидных руд представлена на рис. 1.

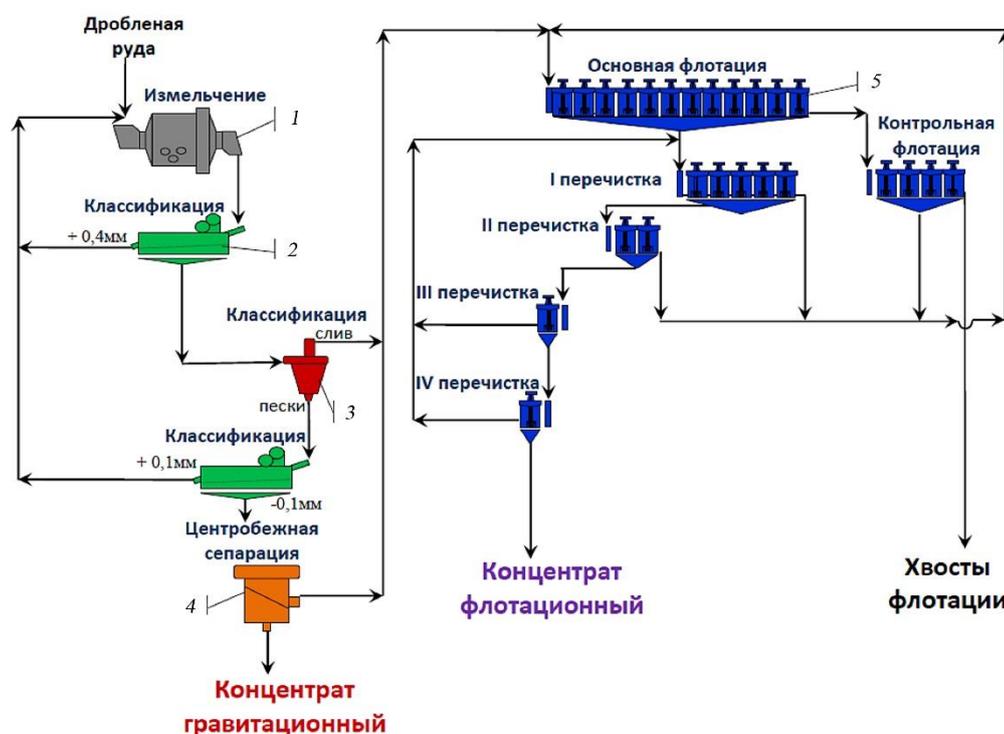


Рис. 1. Схема цепи аппаратов гравитационно-флотационной технологии обогащения малосульфидных платинометаллических руд:

1 — мельница шаровая; 2 — грохот; 3 — гидроциклон; 4 — центробежный сепаратор; 5 — флотомшины

Fig. 1. Equipment flowsheet of gravity-flotation beneficiation technology for low-sulphide platinum metal ores:

1 — ball mill; 2 — screen; 3 — hydrocyclone; 4 — centrifugal separator; 5 — flotation machines

При реализации флотационно-гравитационной схемы получено три продукта гравитационного обогащения — доводки флотационных хвостов: гравитационный концентрат с выходом 0,12 % с массовой долей благородных металлов 9,51 г/т, в т. ч. платины — 2,38 г/т, палладия — 5,99 г/т, золота — 1,14 г/т; гравитационные хвосты с выходом 94,22 %, содержащие 0,75 г/т благородных металлов, в т. ч. платины — 0,05 г/т, палладия — 0,68 г/т, золота — 0,02 г/т; промпродукт с выходом 2,79 %, несколько богаче флотационных хвостов, содержащий 0,98 г/т благородных металлов, в т. ч. платины — 0,12 г/т, палладия — 0,80 г/т, золота — 0,06 г/т.

Таблица 4
Table 4

Результаты гравитационного обогащения хвостов флотации в центрифужном концентраторе
Results of gravity beneficiation of flotation tailings in a centrifugal concentrator

Наименование продукта Product	Выход, % Yield, %	Массовая доля компонента Mass fraction of the component							Извлечение компонента, % Recovery of component, %								
		г/г ppm-w				%			Pt	Pd	Pt	Au	PGE + Au	Ni	Cu		
		Pt	Pd	Au	PGE + Au	Ni	Cu	г/г								г/г	г/г
Концентрат гравитационный Gravity concentrate	0,12	2,38	5,99	1,14	9,51	0,139	0,053	1,05	5,94	1,49	0,43	0,40	1,05	5,94	1,49	0,43	0,40
Промпродукт Intermediate	2,79	0,12	0,80	0,06	0,98	0,045	0,042	3,25	7,27	3,57	3,26	7,31	3,25	7,27	3,57	3,26	7,31
Хвосты Falcon Falcon tailings	94,22	0,05	0,68	0,02	0,75	0,038	0,014	93,36	81,81	92,35	93,09	82,27	93,36	81,81	92,35	93,09	82,27
Хвосты флотации +0,1 мм Flotation tailings +0.1 mm	2,87	0,09	0,56	0,04	0,69	0,043	0,056	2,34	4,98	2,59	3,21	10,02	2,34	4,98	2,59	3,21	10,02
Хвосты флотации Flotation tailings	100	0,06	0,69	0,02	0,77	0,038	0,016	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Содержание никеля и меди в этих гравитационных продуктах соответственно составило: 0,139 и 0,053 %, 0,038 и 0,014 %, 0,045 и 0,042 % соответственно. Выход каждого продукта указан от флотационных хвостов.

В гравитационном концентрате степень концентрации полезных компонентов составила: суммы благородных — 12,4, платины — 39,7, палладия — 8,7, золота — 38,0, никеля — 3,6, меди — 3,3. Гравитационный концентрат и в этом случае значительно обогащен платиной и золотом. Извлечение платины от операции составило 5,36 %, золота — 6,25 %, палладия — 1,07 %, их извлечение от хвостов флотации — 5,11, 5,94, 1,05 % соответственно (табл. 4).

Введение перемешивания концентрата центробежного аппарата позволило повысить его качество по массовой доле благородных металлов, однако гравитационный концентрат и в этом случае значительно беднее флотационного — 9,51 г/т суммы благородных металлов против 133,7 г/т. Для повышения его качества необходимо провести еще 1–2 перемешивания, что вряд ли целесообразно при таких низких значениях содержания благородных металлов в хвостах флотации и, соответственно, очень низком выходе гравитационного концентрата приемлемого качества, несмотря на прирост извлечения золота на 1 %. В хвостах флотации вкрапленных руд норильских месторождений содержание благородных металлов находится на уровне их массовых долей в малосульфидных рудах Кольского п-ова, поэтому их доводка гравитацией экономически оправдана [15].

Заключение

Обоснована рациональность включения гравитационного разделения малосульфидных благороднометалльных руд Кольского п-ова в технологическую схему их обогащения в связи с наличием в них тонкодисперсных платиновых минералов и интерметаллических соединений золота, которые недостаточно полно извлекаются флотацией.

Показано, что комбинированная гравитационно-флотационная технология обогащения тонкодисперсных малосульфидных руд при оптимальном размещении гравитационных аппаратов в цикле измельчения-классификации обеспечивает повышение извлечения благородных металлов на 2,55 %, в т. ч. платины — на 1,84 %, палладия — на 2,45 %, золота — на 8,8 %, а также снижение более чем на 20 % циркуляционной нагрузки в наиболее энергоемкой операции измельчения по сравнению с разработанной ранее флотационной технологией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников Н. Н. Роль Арктики в инновационном развитии экономики России // Горн. журн. 2015. № 7. С. 23–27.
2. Беневольский Б. И., Мызенкова Л. Ф., Августинчик И. А. Минерально-сырьевая база благородных металлов — ретроспектива и прогноз // Руды и металлы. 2007. № 3. С. 25–91.
3. Козловский Е. А. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике мира и России // Горн. журн. 2015. № 7. С. 47–53.
4. Митрофанов Ф. П., Жиров Д. В., Баянова Т. Б. Комплексные прогнозно-поисковые критерии главной металлогенической специализации (малосульфидной Pt-Pd или сульфидной Cu-Ni) раннепротерозойских базит-гипербазитовых расслоенных массивов кристаллических щитов // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1 (4). С. 7–13.
5. Вкрапленные руды норильских медно-никелевых месторождений — перспективный источник платинометалльного сырья / В. А. Рябкин [и др.] // Цветные металлы. 2007. № 7. С. 16–21.
6. Беневольский Б. И., Блинова Е. В., Лобач В. И. Инвестиционная привлекательность резервного фонда месторождений цветных и благородных металлов // Руды и металлы. 2008. № 5. С. 5–9.
7. Субботин В. В., Корчагин А. У., Савченко Е. Э. Платинометалльная минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012 (4). № 1. С. 55–66.
8. Геология и вещественный состав руд малосульфидного платинометалльного месторождения Северный Каменник в Западно-Панском массиве, Кольский полуостров / А. У. Корчагин [и др.] // Руды и металлы. 2016. № 1. С. 42–51.
9. Гроховская Т. Л., Лапина М. И., Мохов А. В. Ассоциации и генезис минералов платиновой группы в малосульфидных рудах месторождения Мончетундра (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 6. С. 520–539.
10. Polovina J. S., Hudson D. M., Jones R. E. Petrographic and geochemical characteristics of postmagmatic hydrothermal alteration and mineralization in the J-M Reef, Stillwater Complex, Montana // Canadian Mineralogist. 2004. Vol. 42, No. 2. P. 261–277.
11. The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements / ed. by L. J. Cabri; Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, 2002. Spec. Vol. 54. 852 p.
12. Петров С. В., Алексеев И. А., Шелухина Ю. С. Технологическая минералогия металлов платиновой группы в месторождениях малосульфидного типа // Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов: сб. науч. тр. Всерос. конф. с междунар. участием (25 мая 2016 г., Санкт-Петербург) / Горн. ун-т. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2016. С. 160–167.
13. Cole S., Ferron C. J. A review

of the beneficiation and extractive metallurgy of the platinum-group elements, highlighting recent process innovations. *SGS Minerals Services: Technical bulletin*, 2002. 43 p. **14.** Комбинированная технология переработки вкрапленных медно-никелевых руд / В. Т. Дьяченко [и др.] // Цветные металлы. 2015. № 2. С. 25–28. **15.** Этапы модернизации и совершенствования оборудования Талнахской обогатительной фабрики / Р. И. Исмагилов [и др.] // Цветные металлы. 2006. № 8. С. 34–38. **16.** Богданович А. В. Интенсификация процессов гравитационного обогащения в центробежных полях // Обогащение руд. 1999. № 1–2. С. 33–35. **17.** Изюитко В. М. Технологические свойства малосульфидных платиносодержащих месторождений // Платина России. Новые нетрадиционные типы платиносодержащих месторождений. Результаты и направления работ по программе «Платина России»: сб. науч. тр. М.: Геоинформмарк, 2005. Т. VI. С. 234–244. **18.** Габов Д. А., Субботин В. В., Савченко Е. Э. Минералы системы Pt-Pd-Te в рудах Федорово-Панского интрузивного комплекса, Кольский п-ов // Труды XV Всероссийской (с междунар. участием) Ферсмановской научной сессии (Апатиты, 2–3 апреля 2018 г.) / под ред. Н. Е. Козлова. Апатиты, 2018. С. 103–107. **19.** Чантурия В. А., Бочаров В. А. Современное состояние и основные направления развития технологии комплексной переработки минерального сырья цветных металлов // Цветные металлы. 2016. № 11. С. 11–18.

Сведения об авторах

Марчевская Валентина Викторовна — кандидат технических наук, доцент по специальности «Обогащение руд», ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: vvm@goi.kolasc.net.ru

Мухина Татьяна Николаевна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: muhina@goi.kolasc.net.ru

Author Affiliation

Valentina V. Marchevskaya — PhD (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: vvm@goi.kolasc.net.ru

Tatyana N. Mukhina — PhD (Engineering), Leading Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: muhina@goi.kolasc.net.ru

Библиографическое описание статьи

Марчевская, В. В. Разработка ресурсосберегающей гравитационно-флотационной технологии обогащения тонкодисперсных малосульфидных руд Кольского полуострова / В. В. Марчевская, Т. Н. Мухина // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 83–94.

Reference

Marchevskaya Valentina V., Mukhina Tatyana N. Development of a Resource-Saving Gravity-Flotation Beneficiation Technology for Fine-Dispersed Low-Sulphide Ores of the Kola Peninsula. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 83–94. (In Russ.).

ОПРОБОВАНИЕ КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩЕГО РЕАГЕНТА НА ОСНОВЕ ГИДРОКСАМОВЫХ КИСЛОТ ПРИ ФЛОТАЦИИ МИНЕРАЛОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Г. В. Митрофанова, Е. В. Черноусенко, Ю. С. Каменева, И. Н. Вишнякова
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

Использование комплексообразующих собирателей — активно развивающееся направление химии флотационных реагентов. Соединения с гидроксаматной группировкой, способные вступать в реакции хелатообразования с ионами переходных металлов, опробованы при флотации различных типов руд — перовскитовой, сфен-апатитовой, медно-никелевой, лопаритовой и колумбит-цирконовой. Из пробы перовскитовой руды Африкандского месторождения (11,78 % TiO_2) в открытом цикле получен перовскитовый концентрат с содержанием 49,9 % TiO_2 при извлечении 52,8 %. Селективное действие гидроксамовых кислот в нефелиновом цикле обогащения сфен-апатитовой руды месторождения Партомчорр (8,23 % TiO_2) обеспечило получение концентрата темноцветных минералов (сфен и эгирин) с содержанием 20,15 % TiO_2 при извлечении 85,2 %.

Из хвостов гравитационного обогащения редкометалльной руды Зашихинского месторождения, содержащих 0,1 % ZrO_2 , 0,067 % Nb_2O_5 , 0,0075 % Ta_2O_5 , получены коллективные цирконо-колумбитовые концентраты с содержанием 7,98 % ZrO_2 и 4,67 % Nb_2O_5 при извлечении 70,0 и 61,8 % соответственно.

Использование гидроксамовых кислот при флотации шламовых продуктов обогащения лопаритовой руды Ловозерского месторождения (0,17 % Nb_2O_5) позволило получить концентрат с содержанием Nb_2O_5 3,7 %.

При флотации сульфидной медно-никелевой руды Печенгского рудного поля (0,52 % Ni и 0,21 % Cu) получен коллективный концентрат с содержанием 7,74 % Ni и 4,47 % Cu с извлечением 39,2 и 56,2 % соответственно.

Ключевые слова:

перовскитовая руда, сфен-апатитовая руда, медно-никелевая руда, лопаритовые шламы, колумбит-цирконовая руда, флотация, гидроксамовые кислоты.

TESTING OF A COMPLEXING REAGENT ON THE BASIS OF HYDROXAMIC ACIDS BY FLOATING TRANSITION METAL MINERALS

Galina V. Mitrofanova, Elena V. Chernousenko, Yuliya S. Kameneva, Irina N. Vishnyakova
Mining Institute of KSC RAS, Apatity, Russia

Abstract

The use of complexing collectors is an actively developing branch of flotation reagent chemistry. Compounds with a hydroxamate group capable of reacting chelation with transition metal ions were tested in flotation of various ore types — perovskite, sphene-apatite, copper-nickel, loparite, and columbite-zirconium. By floating a perovskite ore sample from the Afrikanda deposit (11,78 % TiO_2) in the open cycle the authors obtained the perovskite concentrate with a content of 49,9 % TiO_2 at 52,8 % recovery. A selective action of hydroxamic acids in the nepheline concentration cycle of sphene-apatite ore from the Partomchorr deposit (8,23 % TiO_2) ensured the production of a concentrate of dark-coloured minerals (sphene and aegirine) with a content of 20,15 % TiO_2 at 85,2 % recovery. From the tailings of gravitational concentration of rare-metal ore from the Zashikhinskoe deposit containing 0,1 % ZrO_2 , 0,067 % Nb_2O_5 and 0,0075 % Ta_2O_5 the authors produced collective zirconium-columbite concentrates with a content of 7,98% ZrO_2 and 4,67 % Nb_2O_5 at 70,0 and 61,8 % recovery, respectively. The use of hydroxamic acids in flotation from the sludge concentration products of loparite ore from the Lovozero deposit (0,17 % Nb_2O_5) allowed obtaining a concentrate with 3,7 % Nb_2O_5 content. The flotation of sulphide copper-nickel ore from the Pechenga deposit (0,52 % Ni and 0,21 % Cu) resulted in obtaining a collective concentrate containing 7,74% Ni and 4,47 % Cu at 39,2 and 56,2 % recovery, respectively.

Keywords:

perovskite ore, sphene-apatite ore, copper-nickel ore, loparite sludges, columbite-zircon ore, flotation, hydroxamic acids.

Введение

Флотация занимает ведущее место среди методов обогащения. Более 95 % сульфидных руд цветных, редких и драгоценных металлов и практически все несульфидные руды перерабатываются флотационными методами [1]. Флотацию широко используют в сочетании с другими методами, в том числе и с целью доизвлечения полезного компонента из хвостов обогащения.

Ассортимент используемых при флотации реагентов-собирателей весьма разнообразен и обусловлен различием состава и характеристик перерабатываемого минерального сырья. Одно из развивающихся в последнее время направлений химии реагентов — использование комплексообразующих соединений, представителем которых являются гидроксамовые кислоты (ГК) [2–8].

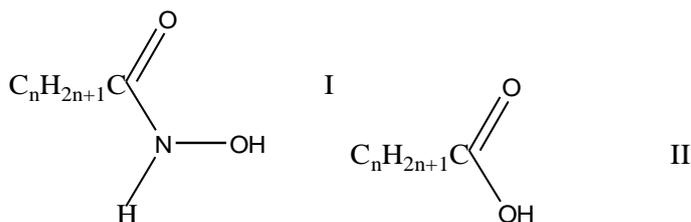
В отечественной практике реагент ИМ-50, в состав которого входят гидроксамовые кислоты, полученные на основе синтетических жирных кислот с общим числом атомов углерода C_7 – C_9 , был предложен как собиратель флотации оловянных, редкоземельных руд и руд редких металлов [1, 9–12]. В настоящее время особенно широко используют гидроксамовые кислоты при флотации руд редкоземельных элементов [13–16], где они выступают конкурентом традиционному жирнокислотному собирателю. И карбоновые, и гидроксамовые кислоты имеют функциональные группировки кислого характера, однако ключевое отличие ГК от жирнокислотного собирателя — это атом азота, с которым соединена ОН-группа [17]. Неподделенная пара электронов на атоме азота вносит дополнительный вклад в перераспределение электронной плотности на атомах функциональной группировки [18, 19].

Считают, что прочность образуемых на поверхности соединений собирателя определяется двумя факторами — вкладом гидрофобного радикала (неселективное действие) и вкладом химической связи функциональной группы реагента (селективное действие [20]), т. е. чем больше вклад функциональной группы в общую стабилизацию системы, тем выше селективность реагента и тем меньше может быть необходимый углеводородный радикал. Так, наиболее распространенным реагентом в ряду гидроксамовых кислот является октилгидроксамовая кислота, превышающая по своей эффективности жирнокислотный собиратель при флотации руд редкоземельных элементов [21, 22], что согласуется с прочностью образуемых этими соединениями комплексов.

Высокая селективность действия гидроксамовых кислот позволила использовать их в качестве собирателя как при флотации руды с высоким содержанием полезного компонента — TiO_2 (перовскитовая руда — 11,78 %, сфен-апатитовая руда — 8,23 %), так и при обогащении бедного техногенного сырья (отходы обогащения лопаритовой руды с содержанием 0,17 % Nb_2O_5 и колумбит-цирконовой руды с содержанием 0,098 % ZrO_2 и 0,065 % Nb_2O_5) с получением высоких показателей флотации. Способность гидроксамовых кислот образовывать прочные комплексные соединения с ионами меди и никеля [17, 19] определила возможность их использования в качестве собирателя и при флотации сульфидных медно-никелевых руд.

Объекты исследования

В качестве собирателя использован реагент ГК, составленный по аналогии с реагентом ИМ-50 как смесь синтезированных по методике [17] алкилгидроксамовых кислот (I) и соответствующих (C_7 – C_8) алкилкарбоновых (II) кислот, взятых в массовом соотношении 3:1.

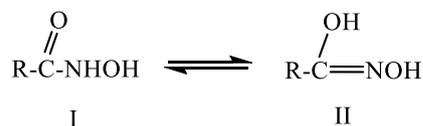


где $n = 7, 8$.

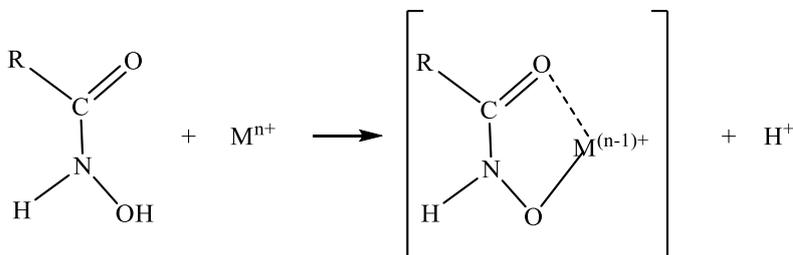
Для флотационных испытаний в качестве тестовых объектов были взяты: перовскитовая руда Африкандского месторождения, сфен-апатитовая руда месторождения Партомчорр, шламовые продукты обогащения лопаритовой руды Ловозерского месторождения, отвальные хвосты гравитационно-магнитного обогащения колумбит-цирконовой руды Зашихинского месторождения и медно-никелевая руда Печенгского рудного поля.

Результаты

Известно, что гидроксамовые кислоты могут существовать в виде двух таутомерных форм:



Однако многочисленными исследованиями методами УФ-, ИК-, ЯМР-спектроскопии, масс-спектрометрии и пр. [17] было показано количественное преобладание формы I, что позволяет представить взаимодействие гидроксамовых кислот с ионами металлов следующим уравнением [19]:



Подобные соединения образуются и на поверхности минерала, так как пространственные затруднения мешают формированию комплекса состава более чем 1:1. Процессы комплексообразования при флотации руд с использованием гидроксамовых кислот подтверждаются установленной количественной зависимостью, связывающей эффективность обогащения и константу образования железных комплексов, а также кислотность реагентов. Согласно полученным данным, чем более прочный комплекс образует реагент — тем больше эффективность обогащения [20].

Способность гидроксамовых кислот образовывать более прочные комплексы с переходными металлами по сравнению с щелочноземельными [23] определила их преимущество перед жирнокислотным собирателем при флотации титан-, цирконийсодержащих руд и руд редкоземельных элементов.

Эффективность действия реагента ГК для флотации титановых минералов показана на примере выделения перовскитового концентрата из перовскитовой руды Африкандского месторождения. Проба руды (11,78 % TiO₂) характеризовалась содержанием основных минералов, %: оливин — 72, перовскит — 15, титаномагнетит — 11; прочие минералы (кальцит, полевопшпат и др.) — 2. После отделения на первой стадии титаномагнетита немагнитную фракцию руды измельчали до флотационной крупности (содержание класса $-0,071 \text{ мм}$ — 69,9 %). Обесшламленный по классу -30 мк продукт флотировали в открытом цикле на водопроводной воде с проведением основной (ОФ), контрольной (КФ) флотаций и перечистных (ПФ) операций. Для создания рН среды использовали серную кислоту.

Для сравнения при флотации перовскитовой руды рассмотрели традиционный жирнокислотный собиратель ЖКТМ (табл. 1).

Из результатов табл. 1 видно, что жирные кислоты (ЖКТМ) по отношению к перовскиту характеризуются низкой активностью и селективностью действия. Увеличение расхода ЖКТМ не привело к существенному улучшению показателей флотации — качественный концентрат не был получен, в то же время высокая селективность реагента ГК позволила получить качественный концентрат и отвальные хвосты с низким содержанием TiO₂.

Таблица 1
Table 1Технологические показатели получения перовскитового концентрата
Technological indices of obtaining perovskite concentrate

Продукт Product	Выход, % Extraction, %	TiO ₂ , %		Расход, г/т Consumption, g/t
		Содержание Content	Извлечение Extraction	
Пенный продукт ПФ-2 Foam product of recleaning flotation 2	15,2	9,42	12,7	ОФ: ЖКТМ — 150, Жст — 150, Неонол — 70, H ₂ SO ₄ — 200 ПФ: ЖКТМ, Неонол, H ₂ SO ₄
Пенный продукт ОФ Foam product of main flotation	23,8	8,06	17,2	Main flotation: fatty acids — 150, Zhst — 150, nonaethylene glycol — 70, H ₂ SO ₄ — 200
Хвосты Tailings	35,3	13,4	67,9	Recleaning flotation: fatty acids, nonaethylene glycol, H ₂ SO ₄
Пенный продукт ПФ-4 Foam product of recleaning flotation 4	10,7	49,39	45,4	ОФ: ГК — 200, Жст — 300, H ₂ SO ₄ — 250
Пенный продукт ОФ Foam product of main flotation	71,2	13,08	80,0	ПФ: H ₂ SO ₄ , ГК Main flotation: GK — 200, Zhst — 300, H ₂ SO ₄ — 250,
Хвосты Tailings	7,2	2,33	1,4	Recleaning flotation: H ₂ SO ₄ , GK

Титансодержащие минералы — сфен и эгирин входят в состав апатитсодержащих руд Хибинских месторождений. В настоящей работе рассмотрена разновидность руды с повышенным содержанием темноцветных минералов, в основном сфена — сфен-апатитовая руда месторождения Партомчорр. При комплексном обогащении таких руд после выделения апатита предусмотрено получение обратной флотацией нефелинового концентрата. В пенный продукт при этом переходят в основном минералы сфен и эгирин. Важной задачей является обеспечение максимальной селективности разделения темноцветных минералов и нефелина. В состав сфена и эгирина входят атомы титана и железа, комплексообразование которых с гидроксамовыми кислотами также хорошо известно [17]. Реагент ГК использовали в нефелиновом цикле обогащения пробы сфен-апатитовой руды с содержанием, %: Al₂O₃ — 13,02; Al₂O₃ к/р — 11,56; Fe₂O₃ — 7,75; FeO — 4,54; TiO₂ — 8,23. Также была испытана традиционная смесь таловых масел (СС): 30 % МСТМхв + 70 % МСТМлист.

Результаты флотационных опытов, проведенных в открытом цикле, представлены в табл. 2.

Полученные результаты показали несомненное преимущество реагента ГК перед жирнокислотным собирателем. При близком содержании Al₂O₃ и TiO₂ в камерном продукте ОФ и пенном продукте второй перерешетки в случае использования реагента ГК извлечение полезных компонентов значительно выше. Смесь ГК с 10 %-й добавкой жирнокислотного собирателя, выполняющего функцию дополнительного собирателя-пенообразователя, позволяет достичь максимальной селективности разделения нефелина и темноцветных минералов. Высокое содержание оксида титана в пенном продукте второй перерешетки обеспечило возможность последующего получения — посредством магнитной сепарации в сильном поле — сфенового концентрата высокого качества с содержанием TiO₂ 36,23 %.

Изучена возможность флотационного доизвлечения тантал-ниобиевого продукта из лопаритовых шламов — одного из продуктов технологической цепи обогащения лопаритовой руды Ловозерского месторождения.

Содержание полезного компонента Nb₂O₅ в исследуемом продукте составило 0,17 %. Кроме лопарита в пробе присутствуют эгирин, полевые шпаты, нефелин, апатит.

Таблица 2

Table 2

Результаты флотационного разделения нефелина и темноцветных минералов

Results of flotation separation of nepheline and dark-colored minerals

Продукт Products	Выход, % Extraction, %	Содержание, % Content, %			Извлечение, % Extraction, %			Расход, г/т Consumption, g/t
		Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe _{общ}	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe _{общ}	
Пенный продукт ПФ-2 Foam product of recleaning flotation 2	32,9	5,26	18,11	7,66	10,5	67,0	45,6	550 — СС 500 — Tall oils mixture
Камерный продукт ОФ Chamber product of main flotation	26,9	25,42	2,16	3,73	41,5	6,5	18,1	
Пенный продукт ПФ-2 Foam product of recleaning flotation 2	35,9	3,42	20,15	7,33	7,7	85,2	49,6	1000 — ГК; 100 — МДТМ 1000 — GK; 100 — MDTM
Камерный продукт ОФ Chamber product of main flotation	50,1	24,92	1,10	3,67	78,4	6,5	34,7	

По гранулометрическому составу лопаритовые шламы являются благоприятным материалом для флотации. Содержание класса $-0,071$ мм в них составляет около 50 %.

Для флотации редкоземельных и редкометалльных руд известно использование в качестве комплексобразующего реагента различных гидроксамовых кислот, эффективность которых обусловлена образованием весьма устойчивых комплексных соединений редкоземельных элементов с органическими лигандами, содержащими в комплексобразующей группе азот и кислород [21, 22, 24–27]. В то же время известно о взаимодействии с гидроксамовыми кислотами железа с образованием прочных внутрикомплексных соединений [17, 19, 23]. Таким образом, ГК адсорбируются на поверхности лопарита за счет взаимодействия с ионами редкоземельных элементов, титана и ниобия, а на поверхности эгирина — за счет железа. Это обуславливает совместную эффективную флотацию этих минералов комплексобразующим реагентом. При этом данный класс соединений проявляет весьма слабую флотационную активность к полевому шпату и нефелину.

В результате флотации лопаритовых шламов с использованием в качестве собирателя реагента ГК и депрессора гексаметафосфата натрия (ГМФ) получен обогащенный продукт с содержанием Nb₂O₅ — 2,11 % при извлечении 57,3 % и отвальные хвосты (табл. 3). Степень концентрации полезного компонента составила 12.

В пенный продукт совместно с лопаритом, несмотря на использование депрессоров, переходит значительное количество эгирина, что обусловлено, как отмечалось выше, совместной эффективной флотацией этих минералов гидроксамовыми кислотами. Для полного удаления эгирина применялась доводка флотационного концентрата электромагнитной сепарацией, что позволило повысить содержание полезного компонента в 2 раза, содержание Nb₂O₅ в этом продукте составило 4,5 %.

Различия во флотируемости лопарита и эгирина могут усиливаться после кислотной обработки коллективного продукта. Проведение в голове процесса коллективной эгирин-лопаритовой флотации синтезированным реагентом ГК с дальнейшей кислотной обработкой коллективного продукта и последующей лопаритовой флотацией с использованием в качестве депрессора ГМФ позволило получить концентрат с содержанием Nb₂O₅ 3,7 %.

Таблица 3
Table 3

Результаты флотационного обогащения лопаритовых шламов, рН — 6,5
Results of flotation beneficiation of loparite slimes, рН — 6,5

Продукт Product	Выход, % Extraction, %	Nb ₂ O ₅ , %		Общий расход реагентов, г/т Total reagent consumption, g/t
		Содержание Content	Извлечение Extraction	
Пенный продукт ПФ-2 Foam product of recleaning flotation 2	4,78	2,11	57,30	235 — H ₂ SO ₄ ; 950 — ГК; 200 — ГМФ; 235 — H ₂ SO ₄ ;
Хвосты Tailings	84,24	0,052	24,71	950 — GK; 200 — Sodium hexametaphosphate

Повышение извлечения полезных компонентов является актуальной задачей при переработке любого минерального сырья. Один из способов решения этой задачи — доизвлечение ценных минералов из хвостов обогащения.

Рассмотрена возможность получения редкометалльного концентрата из хвостов гравитационного обогащения колумбит-цирконовой руды Зашихинского месторождения. Высокая прочность образуемых гидроксамовыми кислотами комплексов с цирконием [28] и ниобием [17] определяет эффективную флотацию колумбита и циркона.

Содержания полезных компонентов в пробе хвостов составили 0,098 % ZrO₂ и 0,065 % Nb₂O₅. В результате минералогических исследований установлено, что примерно 45 % колумбита в пробе хвостов находится в сростках. Поэтому перед проведением флотационных опытов хвосты обогащения колумбит-цирконовой руды подвергались доизмельчению. Содержание класса –0,071 мм в измельченной пробе составило 64,3 %.

Флотацию хвостов гравитационного обогащения колумбит-цирконовой руды проводили в щелочной среде (при рН = 9,7–10,0) в присутствии депрессора гексаметафосфата натрия. Для сравнения приведены результаты, полученные при флотации рассматриваемых хвостов с использованием сульфоксильных собирателей — Аспарала-Ф (N-сульфосукциноил-аспарагиновая кислота) [29] и ПАБСК (полиалкилбензолсульфокислоты) (табл. 4) с проведением перечистных операций в кислой среде [29].

Полученные результаты показывают, что применение ГК в качестве собирателя обеспечивает извлечение в пенный продукт основной флотации 76,1 % ZrO₂ и 68,0 % Nb₂O₅, с получением достаточно бедных хвостов — 0,016 % ZrO₂ и 0,019 % Nb₂O₅. Прочность взаимодействия собирателя с ионами циркония, тантала и ниобия определяет высокую эффективность проведения перечистных операций. Уже во второй перечистке степень концентрации оксидов циркония и ниобия составила 81 и 72 соответственно с небольшими потерями в извлечении.

Использование сульфоксильных собирателей не позволило получить концентрат высокого качества — содержание ZrO₂ и Nb₂O₅ составило 1,3–2,97 и 0,974–1,471 % соответственно. Подтверждением вывода о низкой селективности оксигидрильных собирателей являются результаты флотации с использованием в качестве собирателя смеси реагента ГК и ЖКТМ. Добавка жирнокислотного собирателя приводит к увеличению активности собирательной смеси, но в значительной мере снижает селективность процесса. Эффективность перечистных операций при этом также снижается.

Возможность ГК участвовать в реакциях хелатообразования с ионами цветных металлов определяет их широкое применение в аналитической химии [17, 19], что послужило предпосылкой для опробования их в качестве собирателя при флотации окисленных медьсодержащих руд [30]. Так, для флотации оксидов меди предложен реагентный режим, включающий в себя в качестве собирателя смесь бутилового ксантогената и бензолгидроксамовой кислоты [31].

Таблица 4

Table 4

Результаты флотации хвостов гравитационного обогащения колумбит-цирконовой руды
Results of flotation of gravity beneficiation of columbite-zirconium tailings

Продукт Product	Выход, % Extraction, %	Содержание, % Content, %		Извлечение, % Extraction, %		Расход реагентов, г/т Reagent consumption, g/t
		ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	
Пенный продукт ОФ Foam product of main flotation	18,37	0,459	0,253	76,1	68,0	ОФ: ГМФ — 900; ГК — 1350 Main flotation: sodium hexametaphosphate — 900; ГК — 1350
Пенный продукт ПФ-3 Foam product of recleaning flotation 3	0,44	13,023	7,421	52,4	47,8	
Хвосты Tailings	61,59	0,016	0,019	9,0	17,2	
Пенный продукт ОФ Foam product of main flotation	44,9	0,193	0,109	83,2	75,3	ОФ: ГМФ — 900; ГК — 900; ЖКТМ — 90; pH — 10,0 Main flotation: sodium hexametaphosphate — 900; ГК — 900; fatty acids — 90 pH — 10,0
Пенный продукт ПФ-3 Foam product of recleaning flotation 3	1,58	4,165	2,485	63,6	60,4	
Хвосты Tailings	43,63	0,015	0,021	6,3	14,0	
Пенный продукт ОФ Foam product of main flotation	12,86	0,522	0,352	65,8	62,8	ОФ: Аспарал-Ф — 1000; ЖКТМ — 100; Монтанол-800 — 60 КФ: Аспарал Ф — 250; ЖКТМ — 50 ПФ-1: H ₂ SO ₄ — 400; pH — 9,7 Main flotation: Asparal-F — 1000; fatty acids — 100; Montanol 800 — 60 Check flotation: Asparal-F — 250; fatty acids — 50 Recleaning flotation 1: H ₂ SO ₄ — 400 pH — 9,7
Пенный продукт ПФ-2 Foam product of recleaning flotation 2	3,75	1,313	0,974	48,4	50,8	
Хвосты Tailings	75,77	0,032	0,026	23,8	27,6	
Пенный продукт ОФ Foam product of main flotation	32,46	0,232	0,149	81,1	79,3	ОФ: ПАБСК — 1000 ПФ-1: H ₂ SO ₄ — 300 ПФ-2: H ₂ SO ₄ — 100 pH — 6,8 Main flotation: polyalkylbenzene sulfonic acids — 1000 Recleaning flotation 1: H ₂ SO ₄ — 300 Recleaning flotation 2: H ₂ SO ₄ — 100 pH — 6,8
Пенный продукт ПФ-3 Foam product of recleaning flotation 3	1,44	2,97	2,089	45,8	49,2	
Хвосты Tailings	56,96	0,015	0,012	9,2	11,2	

Настоящие исследования проводили на труднообогатимой медно-никелевой руде Печенгского рудного поля, характеризующейся мелкой сульфидной вкрапленностью, значительной серпентинизацией и замещением вкрапленников магнетитом. Содержание основных компонентов в пробе составило: Ni — 0,495 %, Cu — 0,211 %.

Флотационные опыты включали основную и контрольную сульфидную флотацию в щелочной среде с получением хвостов и чернового концентрата. Последний в дальнейшем подвергали перечистке с получением готового медно-никелевого концентрата. Традиционными собирателями для флотации сульфидных руд, в том числе и медно-никелевых, являются серосодержащие реагенты — ксантогенаты (Кх) и аэрофлоты (Аф), по сравнению с которыми проводили оценку действия гидроксамовых кислот (табл. 5).

Таблица 5
Table 5

Результаты флотации медно-никелевой руды
Results of flotation of copper-nickel ores

Продукт Product	Выход, % Extraction, %	Содержание, % Content, %		Извлечение, % Extraction, %		Расход реагентов, г/т Reagent consumption, g/t
		Ni	Cu	Ni	Cu	
Черновой концентрат Rough concentrate	27,21	1,47	0,641	78,66	85,99	Кх — 175 Аф — 123
Пенный продукт ПФ-2 Foam product of recleaning flotation 2	3,15	7,23	3,96	44,81	61,58	КМЦ — 217 Xanthates — 175 Dithiophosphates — 123
Хвосты Tailings	72,79	0,149	0,039	21,34	14,01	Carboxymethyl- cellulose — 217
Черновой концентрат Rough concentrate	42,26	1,03	0,446	82,82	88,81	Кх — 149 ГК — 149
Пенный продукт ПФ-3 Foam product of recleaning flotation 3	2,66	7,74	4,47	39,26	56,18	КМЦ — 346 Xanthates — 149 GK — 149
Хвосты Tailings	57,74	0,156	0,041	17,18	11,19	Carboxymethyl- cellulose — 346

Опыты проводили в открытом цикле. Необходимое значение pH среды (9,5–10,3) создавали добавлением кальцинированной соды (Na_2CO_3). При флотации использовали активатор — медный купорос (CuSO_4) и депрессор породообразующих минералов — карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ).

Необходимая крупность измельчения руды, установленная предварительно проведенными минералого-технологическими исследованиями, составила 97 % класса $-0,071$ мм [32]. Оптимальный расход собирателей в стандартном реагентном режиме: Кх — 175 г/т, Аф — 123 г/т. В ходе проведения исследований установлено, что наиболее предпочтительным является совместное использование реагента ГК с ксантогенатом при исключении из собирательной смеси аэрофлота. Соотношение ГК:Кх, согласно исследованиям, составило 1:1.

Из полученных данных следует, что использование комплексообразующего реагента совместно с ксантогенатом (вместо аэрофлота) позволяет получить сравнимые показатели извлечения ценных компонентов в черновой концентрат. Ввиду повышенного выхода чернового концентрата из труднообогатимой руды, при использовании реагента ГК для получения готового концентрата требуется повышенный расход КМЦ и дополнительная перечистная операция. Полученные концентраты характеризуются близким качеством и извлечением никеля и меди.

Заключение

Высокая комплексобразующая способность гидроксамовых кислот по отношению к атомам переходных металлов обуславливает перспективу их широкого использования для флотационного обогащения. Проведенные исследования показали эффективность применения ГК для выделения титан-, цирконий-, тантал-, ниобиевых минералов из несulfидных руд. Результатами флотации медно-никелевой руды показана принципиальная возможность использования гидроксамовых кислот при флотации сульфидных руд цветных металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябой В. И. Проблемы использования и разработки новых флотореагентов в России // Цветные металлы. 2011. № 3. С. 7–14.
2. Two new structures of hydroxamate collectors and their application to ilmenite and wolframite flotation / L. Xia [et al.] // 47 Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference. Ottawa, 2015. P. 186–193.
3. Flotation Behaviors of Perovskite, Titanogite and Magnesium Aluminate Spinel Using Octyl Hydroxamic Acid as the Collector / W. Wang [et al.] // Minerals. 2017. Vol. 7. P. 134. DOI: 10.3390/min7080134.
4. Wang X., Nguyen A. V., Miller J. D. Selective attachment and spreading of hydroxamic acid-alcohol collector mixtures in phosphate flotation // International J. Mineral Processing. 2006. 78 (2). P. 122–130. URL: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2005.09.005>.
5. Surface chemistry considerations in the flotation of bastnesite / A. Jordens [et al.] // Minerals Engineering. 2014. P. 66–68. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.04.013.
6. Zhang J., Edwards C. A review of rare earth mineral processing technology // 44th Annual Meeting of The Canadian Mineral Processors. CIM. Ottawa, 2012. P. 79–102.
7. Lee J. S., Nagaraj D. R., Coe J. E. Practical aspects of oxide copper recovery with alkyl hydroxamates // Mineral Engineering. 1998. Vol. 11. P. 929–939.
8. Quantitative mineralogy to assess the efficacy of alkyl hydroxamates in flotation / T. Bhambhani [et al.] // Proc. IMPC-2018. М., 2018.
9. Щукина Н. Е., Рябой В. И. Обогащение руд. М.: Metallurgy, 1970. 175 с.
10. Hydroxamic acids as collectors in the flotation of wolframite cassiterite and pyrochlore / O. S. Bogdanov [et al.]; M. J. Jones (ed.) // 10th International Mineral Processing Congress. London, 1973. P. 553–564.
11. Польшин С. И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов. М.: Недра, 1987. 428 с.
12. Найфонов Т. Б., Белобородов В. И., Захарова И. Б. Флотационное обогащение комплексных титановых и циркониевых руд. Апатиты: КНЦ РАН, 1994. 156 с.
13. Ivanova V. A., Mitrofanova G. V., Chernousenko E. V. Application of Complexing Reagents-Collectors in Rare-Metal and Rare-Earth Ore // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2017. Vol. 17, No. 11. P. 759–766.
14. The effect of dissolved mineral species on bastnesite, monazite and dolomite flotation using benzohydroxamate collector / E. R. L. Espiritua [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018. Vol. 539. P. 319–334.
15. Blankson Abaka-Wood G., Addai-Mensah J., Skinner W. A Study of flotation characteristics of monazite, hematite, and quartz using anionic collectors // International J. Mineral Processing. 2017. Vol. 158. P. 55–62.
16. Zhang W., Honaker R. Q., Groppo J. G. Flotation of monazite in the presence of calcite, part I: Calcium ion effects on the adsorption of hydroxamic acid // Minerals Engineering. 2017. Vol. 100. P. 40–48.
17. Пилипенко А. Т., Зульфигаров О. С. Гидроксамовые кислоты. М.: Наука, 1989. 312 с.
18. Греков А. П., Веселов В. Я. α -Эффект в химии органических соединений // Успехи химии. 1978. Т. XLVII, № 7. С. 1200–1230.
19. Rappoport Z., Liebman J. F. The chemistry of hydroxylamines, oximes and hydroxamic acids. Wiley, 2008. Vol. 1. 1078 p.
20. Богданов О. С., Гольман А. М., Каковский И. А. Физико-химические основы флотации. М.: Наука, 1983. 264 с.
21. A new collector for rare earth mineral flotation / J. Ren [et al.] // Minerals Engineering. 1997. P. 1395–1404.
22. Pradip, Fuerstenau D. W. Design and development of novel flotation reagents for the beneficiation of Mountain Pass rare-earth ore // Minerals and Metallurgical Processing. 2013. No. 1. P. 1–9.
23. Fuerstenau M. C. Chelating Agents as Flotation Collectors // Innovations in Natural Resource Processing: Proceedings of the Jan D. Miller Symposium. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. Salt Lake City, 2005. P. 33–56.
24. Beneficiation studies for the comprehensive recovery of a tantalum-niobium ore / Xiaoping Xu [et al.] // Proceedings IMPC. 2012. P. 5892–5898.
25. Pradip, Fuerstenau D. W. The role of inorganic and organic reagent in the flotation separation of rare-earth ores // International J. Mineral Processing. 1991. Vol. 32. P. 1–22.
26. Gak T. L., Tusupbaev N. K., Abdikulova A. O. Improvement of a beneficiation technology for rare and rare-earth metal ore // "Plaksin readings — 2013" International Meeting (2013, 16–19 September). Tomsk, 2013. P. 317–318.
27. Ivanova V., Mitrofanova G. Flotation of eudialyte: correlation of experimental data with the results of quantum-chemical calculations // XVI Balkan Mineral Processing Congress "BMPC — 2015". 2015. P. 347–351.
28. Baroncelli F., Grossi G. The complexing power of hydroxamic acids and its effect on the behaviour of organic extractants in the reprocessing of irradiated fuels — I the complexes between benzohydroxamic acid and zirconium, iron (III) and uranium (VI) // J. Inorganic and Nuclear Chemistry. 1965. Vol. 27, No. 5. P. 1085–1092.
29. Kurkov A. V., Pastukhova I. V. Flotation method of rare-metal ore and tin. Patent RU 2381073 C1.
30. Fuerstenau D. W., Urbinab R. H., McGlashan D. W. Studies on the applicability of chelating agents as universal collectors for copper minerals // International J. Mineral Processing. 2000. Vol. 58, No. 1–4. P. 15–33.
31. Copper oxide flotation using the combined collectors of benzohydroxamic acid and butyl xanthate / Chen Daixiong [et al.] // IMPC 2016 XXVIII International Mineral Processing Congress (11–15 September, 2016). Qubec, 2016.
32. Повышение эффективности флотационного обогащения сульфидных медно-никелевых руд Печенгского рудного поля / Е. В. Черноусенко [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 6. С. 173–179.

Сведения об авторах

Митрофанова Галина Викторовна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН
E-mail: atletik-2010@yandex.ru

Черноусенко Елена Владимировна — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: chern@goi.kolasc.net.ru

Каменева Юлия Сергеевна — младший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: Dgeremi@mail.ru

Вишнякова Ирина Николаевна — младший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: potarova514@mail.ru

Author Affiliation

Galina V. Mitrofanova — PhD (Engineering), Leading Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: atletik-2010@yandex.ru

Elena V. Chernousenko — Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: chern@goi.kolasc.net.ru

Yuliya S. Kameneva — Junior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: Dgeremi@mail.ru

Irina N. Vishnyakova — Junior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: potarova514@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Митрофанова, Г. В. Опробование комплексообразующего реагента на основе гидроксамовых кислот при флотации минералов переходных металлов / *Г. В. Митрофанова [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2 (11). — С. 95–104.

Reference

Mitrofanova Galina V., Chernousenko Elena V., Kameneva Yuliya S., Vishnyakova Irina N. Testing of a Complexing Reagent on the Basis of Hydroxamic Acids by Floating Transition Metal Minerals. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 95–104. (In Russ.).

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ
ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА В ХРАНИЛИЩАХ КОНТЕЙНЕРНОГО ТИПА
ДЛЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА
РЕАКТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

В. А. Наумов, С. А. Гусак

ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация

Представлены результаты исследований, целью которых являлось изучение закономерностей образования остаточного тепловыделения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) из реакторов атомных станций малой мощности (АСММ), разрабатываемых в России и отличающихся технологией теплоносителя — водо-водяных и жидкометаллических. Установлено, что при времени выдержки ОЯТ, равной или больше продолжительности топливного цикла, образование остаточного тепловыделения определяется смесью продуктов деления и актиноидов. С увеличением времени выдержки ОЯТ вклад α -распада актиноидов в полное остаточное тепловыделение повышается.

На основе разработанной трехмерной модели одиночного контейнера ТУК-120 с ОЯТ изучены особенности формирования температурного режима контейнера при свободной конвекции на его боковой поверхности. Результаты исследований позволяют сделать вывод, что интенсивность свободно-конвективного теплообмена может обеспечить отвод остаточного тепловыделения в соответствии с нормативными требованиями по тепловой безопасности сухого хранения контейнеров с ОЯТ из реакторов АСММ различного типа.

Ключевые слова:

реакторы малой мощности, отработавшее ядерное топливо, остаточное энерговыделение, продукты деления, актиноиды, контейнер ТУК-120, температурный режим, свободно-конвективный теплообмен.

**STUDY OF FORMATION REGULARITIES OF HEAT SOURCES
IN THE CASK TYPE STORAGE FACILITIES FOR SPENT NUCLEAR FUEL
OF THE LOW-POWER REACTORS**

Vadim A. Naumov, Sergey A. Gusak

Mining Institute of KSC RAS, Apatity, Russia

Abstract

The paper presents the results of studies, the purpose of which was to study the generation regularities of residual heat of spent nuclear fuel (SNF) from the reactors of small nuclear power plants (SNPP), which are developed in the Russia and different in coolant technology: pressurized water reactors and liquid-metal reactors. It was found that when the cooling time of SNF is equal or greater than the fuel cycle duration, the generation of residual heat is determined by the mixture of fission products and actinides. With increasing cooling time of SNF the contribution of α -decay of actinides to the total residual heat is increased.

Based on the developed 3D model of a single TUK-120 container with SNF, the features of temperature regime formation of the container with free convection on its side surface, have been studied. The results show that the intensity of free convection heat transfer can provide the residual heat removal in compliance with the regulatory requirements for thermal safety of dry storage of containers with SNF from SNPP reactors of various types.

Keywords:

low-power reactors, spent nuclear fuel, residual heat, fission products, actinides, TUK-120 container, temperature regime, free convection heat transfer.



Введение

Необходимость решения проблемы модернизации и развития энергетической инфраструктуры, которое рассматривается в качестве одной из приоритетных задач государственной политики Российской Федерации в Арктике [1], обуславливает реальные перспективы практического внедрения проектов атомных станций малой мощности для энергоснабжения удаленных территорий арктических регионов РФ. В условиях удаленности потенциальных площадок размещения АСММ от центров атомного машиностроения и объектов переработки отработавшего ядерного топлива проявляется объективная необходимость создания на станции инфраструктуры, связанной с хранением облученного топлива.

В основу государственной политики РФ в области обращения с ОЯТ положен принцип переработки облученного топлива для обеспечения экологически приемлемого обращения с продуктами деления и возврата в ядерный топливный цикл регенерированных ядерных материалов. В особых случаях, связанных с большой удаленностью атомной станции, отсутствием адекватной транспортно-технологической инфраструктуры или технологии переработки отдельных видов ОЯТ, рассматривается вариант долговременного промежуточного хранения топлива с отсрочкой на будущее принятия решения об окончании топливного цикла. Примером такого варианта обращения с ОЯТ является хранилище контейнерного типа на территории ФГУП «Атомфлот» (Мурманск), предназначенное для хранения сроком до 50 лет неперерабатываемого в настоящее время уран-циркониевого топлива атомного ледокольного флота. Хранение отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) осуществляется в двухцелевых (хранение и транспортировка) контейнерах типа ТУК-120 [2].

Учитывая удаленность потенциальных площадок размещения АСММ, рассматриваемых в качестве источников энергоснабжения в труднодоступных районах российской Арктики, можно полагать, что одним из возможных вариантов обращения с ОЯТ из реакторов АСММ является сухое хранение топлива на площадке станции в течение всего срока ее эксплуатации. Концепция контейнерного хранения ОЯТ реакторов АСММ является предметом комплексных исследований по обоснованию методологии создания подземных АСММ в условиях Арктики, которые проводились лабораторией проблем освоения и рационального использования подземного пространства Горного института КНЦ РАН в рамках государственных заданий по теме 0232-2014-0027 и получили свое развитие в НИР по теме 0226-2018-0008_ГоИ. Постановка этих исследований обусловила решение комплексной научно-технической задачи, посвященной изучению различных аспектов безопасности сухого хранения ОЯТ реакторов АСММ в подземных модулях. Наряду с ядерной и радиационной безопасностью одним из основных факторов, определяющих условия эксплуатации хранилища облученного топлива, является температурный режим модуля хранения ОЯТ подземной АСММ. Изучение этого проблемного вопроса определила необходимость постановки и решения ряда научных задач, которые в обобщенном виде могут быть сформулированы следующим образом:

- анализ новаций в проектах реакторных установок АСММ, которые оказывают влияние на остаточное тепловыделение ОЯТ, в частности, влияние энерговыработки активных зон на накопление радиоактивности долгоживущих радионуклидов, которые определяют величину остаточных тепловыделений при длительном времени хранения топлива;
- оценка динамики тепловыделений ОЯТ в подземных модулях за период эксплуатации АСММ разных типов;
- изучение влияния конструктивно-компоновочных решений подземного модуля хранения ОЯТ на его тепловой режим и на тепловое состояние ограждающих конструкций.

В настоящей статье представлены результаты завершенных исследований, целью которых являлось изучение закономерностей образования источников тепла в подземных модулях хранилищ контейнерного типа и особенностей формирования температурного режима контейнера ТУК-120 для ОЯТ реакторов АСММ, разрабатываемых в России и отличающихся технологией теплоносителя: водо-водяные реакторы (АБВ, «УниTERM», РИТМ-200М) и жидкометаллические реакторы (СВБР-10 и СВБР-100).

Остаточные тепловыделения ОЯТ реакторов АСММ

Одним из ключевых вопросов в задаче изучения температурного режима хранилища ОЯТ является определение мощности остаточного энерговыделения (МОЭ), развивающейся в облученном топливе в конце кампании активной зоны реактора за счет радиоактивного распада продуктов деления (ПД) и актиноидов. Суммарная величина МОЭ продуктов деления после останова реактора является фундаментальным фактором безопасности. Для ее определения в США разработана математическая программа (стандарт) ANSI/ANS-5.1-1979 [3]. В этой программе обобщены результаты моделирования цепочек распада ПД, параметры которых были установлены экспериментально. Данная компиляция объединяет группы цепочек с примерно одинаковыми временами распада и описывает выход энергии за счет продуктов деления ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu в виде суммы экспонент для времен выдержки ОЯТ до 30 лет. Мощность остаточного энерговыделения зависит от эксплуатационной мощности реактора и продолжительности его работы, которые определяют энерговыработку активной зоны, а также от времени выдержки ОЯТ.

Применение стандарта ANSI/ANS-5.1-1979 для расчета остаточного энерговыделения в ОЯТ реакторов АСММ является естественным, так как для них характерны большая продолжительность кампании самого реактора и время выдержки топлива. Однако методика стандарта ANSI/ANS-5.1-1979 имеет существенные недостатки. Она не учитывает вклад в остаточное энерговыделение α -распада актиноидов, а также приближенно описывает образование долгоживущих ПД. Проверка эффективности стандарта ANSI/ANS-5.1-1979 была выполнена на примере сопоставления данных по остаточному энерговыделению в ОЯТ реактора ВВЭР-1000, полученных независимыми методами — ANSI/ANS-5.1-1979 и программа AFPA [4]. Программа AFPA детально учитывает накопление ПД и актиноидов в реакторе ВВЭР-1000 с учетом изменения изотопного состава топлива, спектра нейтронов в реакторе и его изменения в процессе топливного цикла. Результаты сравнительной оценки для ВВЭР-1000 при его трехгодичной эксплуатации и средней тепловой мощности 2588 МВт показали значительные погрешности прогнозирования МОЭ по стандарту ANSI/ANS-5.1-1979 в диапазоне 8–33 %, если дополнительно не учитывается вклад α -распада при выдержке ОЯТ от 10 до 30 лет.

Для расчета МОЭ за счет β -распада ПД в ОЯТ реакторов АСММ был использован стандарт ANSI/ANS-5.1-1979. Дополнительный вклад в остаточное тепловыделение от α -распада актиноидов в облученном топливе реакторов АСММ рассчитывался по изотопным массовым составам ОЯТ, полученным авторами и приведенным в работе [5]. Принимался во внимание α -распад радионуклидов, которые вносят доминирующий вклад в остаточное тепловыделение ОЯТ (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am и ^{244}Cm), что определяется массовым содержанием актиноидов в облученном топливе и периодом их полураспада. Величина МОЭ определялась по следующему соотношению:

$$n_{\alpha} = (a_0/b_0) \cdot m \cdot E_{\alpha} \cdot \exp(-\tau \ln 2 / T_{1/2}),$$

где n_{α} — мощность тепловыделения, Вт; E_{α} — энергия α -частиц, МэВ/распад; m — масса радионуклида в активной зоне на момент окончания кампании, кг; $T_{1/2}$ — период полураспада, лет; a_0 — удельная активность радионуклида, Бк/кг; τ — время выдержки, лет; b_0 — коэффициент размерностей, равный $6,242 \cdot 10^{12}$ МэВ/(с·Вт).

Принятые значения ядерно-физических констант приведены в табл. 1.

Ядерно-физические константы актиноидов в активных зонах реакторов АСММ,
принятые в расчетах МОЭ за счет α -распада
Nuclear-physical constants of actinides in the cores of SNPP reactors accepted
in the calculation of residual heat due to the α -decay

Нуклид Nuclide	$T_{1/2}$, лет $T_{1/2}$, years	E_α , МэВ/распад E_α , MeV/decay	a_0 , ТБк/кг a_0 , ТВq/kg
^{238}Pu	87,7	5,59	633
^{239}Pu	24100	5,11	2,3
^{240}Pu	6570	5,26	8,43
^{241}Am	432	5,64	127
^{244}Cm	18,1	5,87	2990

В расчетах МОЭ принимались следующие значения энерговыработки (ГВт·сут) активных зон реакторов АСММ, установленные на основе анализа проектных данных [5]: АБВ — 131,5; «УниTERM» — 181; РИТМ-200М — 291,7; СВБР-10 — 243; СВБР-100 — 631.

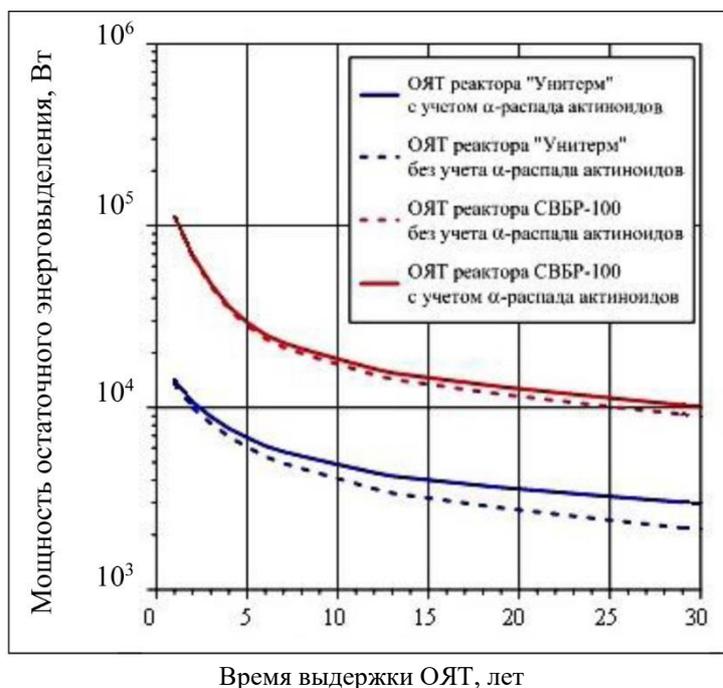


Рис. 1. Зависимость мощности остаточного энерговыделения ОЯТ из одной активной зоны реакторов «УниTERM» и СВБР-100 от времени выдержки топлива

Fig. 1. Dependence of residual heat of SNF from one core of “Uniterm” and SVBR-100 reactors on cooling time

В качестве примера результатов расчетов на рис. 1 приведена динамика изменения МОЭ облученного топлива из одной активной зоны реакторов «УниTERM» и СВБР-100 в зависимости от времени выдержки топлива с учетом и без учета α -распада актиноидов. В кратком комментарии данных рис. 1 можно отметить, что мощность остаточного энерговыделения ОЯТ из активной зоны реактора СВБР-100 значительно превосходит величину МОЭ облученного топлива реактора «УниTERM», что объясняется более высокой эксплуатационной тепловой мощностью жидкометаллического реактора. В течение первых пяти лет после останова реактора остаточное энерговыделение ОЯТ определяется в основном радиоактивным распадом продуктов деления.

В последующий период проявляется существенный вклад α -распада актиноидов в суммарную величину МОЭ, который увеличивается со временем. При времени выдержки ОЯТ в интервале от 10 до 30 лет вклад α -распада возрастает от 6 до 11 % для ОЯТ реактора СВБР, а для облученного топлива реактора «УниTERM» вклад актиноидов повышается с 16 до 28 %. Различия в относительном вкладе актиноидов обусловлены изотопным составом ОЯТ, который, наряду с энерговыработкой активных зон и временем выдержки топлива, в значительной степени определяется особенностью спектров плотности потока нейтронов, характерных для активных зон водо-водяных и жидкометаллических реакторов.

В табл. 2 приведены данные, иллюстрирующие различия в величине МОЭ топлива проектируемых реакторов АСММ и эксплуатирующихся реакторов большой мощности типа ВВЭР-1000. Приведенные данные показывают, что МОЭ одной тонны ОЯТ реакторов АСММ в 1,5–2 раза превышает аналогичный параметр для реактора ВВЭР-1000, что объясняется более глубоким (также в 1,5–2 раза) выгоранием топлива в активных зонах реакторов АСММ. Результаты сравнительной оценки свидетельствуют об актуальности изучения задачи отвода остаточных тепловыделений от ОЯТ реакторов АСММ.

Таблица 2

Table 2

Сравнение МОЭ облученного топлива реакторов коммерческой АЭС и АСММ, МВт/т U

Comparison of residual heat of the irradiated fuel from reactors of the commercial NPP and SNPP, MW/t U

Реактор Reactor	Время выдержки ОЯТ, лет / Cooling time, years								
	3			10			30		
	Актиноиды Actinides	ПД FP	Сумма Total	Актиноиды Actinides	ПД FP	Сумма Total	Актиноиды Actinides	ПД FP	Сумма Total
ВВЭР-1000 WWER-1000	0,26	3,64	3,90	0,25	1,10	1,35	0,26	0,60	0,86
«УниTERM» “Uniterm”	0,48	5,18	5,66	0,51	2,58	3,09	0,53	1,35	1,88
АБВ ABV	0,34	5,26	5,60	0,37	2,36	2,73	0,40	1,23	1,63
РИТМ-200 RITM-200	0,37	6,32	6,69	0,41	2,46	2,87	0,45	1,28	1,73
СВБР-100 SVBR-100	0,13	5,07	5,20	0,13	1,89	2,02	0,13	0,98	1,11

Оценки величины МОЭ топлива, загружаемого в контейнер ТУК-120, выполнялись в предположении, что после выдержки в приреакторном хранилище облученное топливо перегружается в контейнеры, которые помещаются на хранение в подземный модуль хранилища ОЯТ. При этом время выдержки ОЯТ реакторов различного типа принималось равным продолжительности соответствующего топливного цикла [5]. Исключение составляет ОЯТ реактора СВБР-100, для которого, согласно технологической схеме обращения с ОЯТ в проекте опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой этого типа [6], время выдержки в приреакторном хранилище принималось равным 21 году. Результаты оценки МОЭ в контейнерах ТУК-120 приведены в табл. 3.

Мощность остаточного энерговыделения в контейнере ТУК-120 зависит от количества размещенных в нем ОТВС и численно может быть определена по соотношению между числом ОТВС в контейнере и активной зоне (коэффициент загрузки ТУК-120). Приведенные в табл. 3 данные соответствуют варианту размещения ОТВС в контейнере в два яруса, при котором формируется наиболее высокая энергонапряженность в контейнере. Для оценки коэффициента загрузки контейнеров ТУК-120 были проведены исследования ядерной безопасности, целью которых являлось определение компоновки ОТВС в контейнере, отвечающей нормативному требованию по безопасности [7]. По результатам исследований установлено, что ядерно безопасная

загрузка ТУК-120 топливом из активных зон реакторов различного типа обеспечивается при следующем количестве ОТВС, размещаемых в контейнере: «УниTERM» — 70; АБВ — 42; РИТМ-200М — 42; СВБР-10 — 14; СВБР-100 — 14.

Таблица 3
Table 3

Остаточные тепловыделения ОЯТ активных зон и в контейнерах ТУК-120
Residual heat of the spent nuclear fuel from cores and in the TUC-120

Реактор АСММ SNPP reactor	Время выдержки, лет Cooling time, years	Мощность остаточного энерговыделения в активной зоне, Вт Residual heat in core, W			Коэффициент загрузки ТУК-120 Load factor of TUC-120	МОЭ в ТУК-120, Вт Residual heat into TUC-120, W
		Продукты деления Fission products (ANSI/ANS-5.1-1979)	Актиноиды (α -распад) Actinides (α -decay)	Полная МОЭ Total residual heat		
«УниTERM» “Uniterm”	20,6	2700	833	3533	0,2642	933
АБВ ABV	12	2905	522	3427	0,3471	1190
РИТМ-200М RITM-200M	7	9754	1250	11004	0,2111	2323
СВБР-10 SVBR-10	19	3864	407	4271	0,5185	2215
СВБР-100 SVBR-100	21	11240	1172	12412	0,2295	2849

Как видно из табл. 3, величина МОЭ в контейнере ТУК-120 варьирует в широком интервале значений от 930 до 2850 Вт. Наибольшее значение относится к реактору СВБР-100, что объясняется, как отмечалось ранее, наиболее высокой эксплуатационной мощностью реактора.

Температурный режим контейнеров ТУК-120

Величина МОЭ в упаковках с топливом определяет интенсивность источников тепла в хранилище ОЯТ контейнерного типа и оказывает основное влияние на процессы гидродинамики и теплообмена в помещении хранилища для ОЯТ реакторов различного типа. В качестве первого этапа исследования этих процессов в работе рассмотрена задача по оценке особенностей формирования температурного режима контейнера в условиях свободно-конвективного теплообмена на его боковой поверхности.

Температуры материалов контейнера ТУК-120 могут быть определены из решения нестационарной задачи о разогреве контейнера после загрузки его тепловыделяющими сборками. Решение этой задачи требует изучения теплообмена между контейнером и окружающей его средой (воздух) на внешних границах контейнера. Граничный теплообмен является сложной функцией гидродинамики течения воздуха, формирующегося при разогреве контейнера. Так, например, в работе японских авторов [8] рассмотрены экспериментально-теоретические исследования, в которых детально изучена теплогидравлика в хранилище контейнерного типа. В экспериментальной модели хранилища 24 контейнера диаметром 500 мм с единичным тепловыделением 20 кВт размещались в 6 рядов по квадратной решетке с шагом 800 мм. По результатам экспериментальных исследований, в частности, было определено увеличение теплоотдачи за счет вынужденной конвекции, которая обусловлена действием выталкивающей силы из выхлопной трубы только для части контейнеров, расположенных наиболее близко ко входу воздуха. Для контейнеров дальних рядов, где наблюдаются застойные зоны, теплообмен осуществляется за счет свободной конвекции.

Для оценки эффективности свободной конвекции в процессе отвода тепла применительно к контейнерному хранилищу ОЯТ рассматриваемых реакторов АСММ были выполнены расчетные исследования в модели одиночного контейнера с использованием математической программы FFM, разработанной в Горном институте КНЦ РАН. Эта программа позволяет реализовать численное решение уравнения нестационарной теплопроводности в трехмерной постановке.

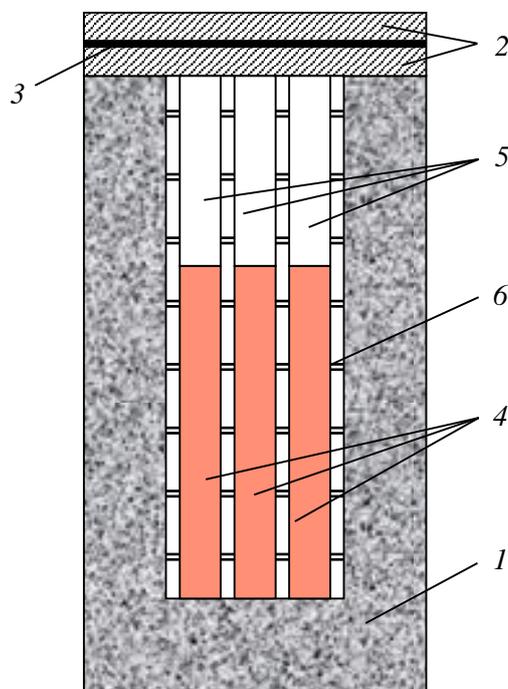


Рис. 2. Схематический вид модели контейнера ТУК-120:
 1 — корпус контейнера; 2 — стальные крышки; 3 — прокладка; 4 — зона чехлов с ОТВС;
 5 — зона чехлов без ОТВС; 6 — стальные диафрагмы

Fig. 2. Schematic view of the container model of TUK-120:
 1 — container body; 2 — steel lids; 3 — gasket; 4 — area of cases with fuel;
 5 — area of cases without fuel; 6 — steel diaphragms

Контейнер ТУК-120 разработан на базе металлобетонного контейнера ТУК-108/1, который был модернизирован для двухъярусного размещения ОТВС. Одной из основных особенностей этих контейнеров является конструкция корпуса диаметром примерно 1,6 м. Корпус контейнера толщиной 421 мм выполнен из трех концентричных стальных оболочек, пространство между которыми заполнено металлическим армокаркасом и залито особо прочным сверхтяжелым бетоном [9]. В схематическом виде модель контейнера ТУК-120, которая использована теплофизических расчетах, представлена на рис. 2. Эти расчеты проводились на основе модельного представления, в соответствии с которым контейнер установлен на основании горной выработки, моделируемом слоем гранита толщиной 50 м с граничным условием первого рода (начальная температура породы 7 °С) на его нижней поверхности.

Основные элементы алгоритма программы FFM для расчета процесса теплопередачи в конструктивных элементах контейнера ТУК-120, а также теплообмена излучением между поверхностью контейнера и поверхностью подземного хранилища ОЯТ достаточно подробно рассмотрены в работе авторов [10].

На первом этапе исследований свободной конвекции на боковой поверхности контейнера была выполнена оценка коэффициентов теплоотдачи при ламинарном и турбулентном режимах движения охлаждающей среды (воздуха). Целевым назначением этой задачи являлась оценка

протяженности зоны ламинарного режима по высоте контейнера и определение средней по высоте величины коэффициента теплоотдачи при постоянной плотности теплового потока. При этом принято допущение, что воздух поступает в пространство между контейнерами снизу при равномерном распределении по всей площади хранения с постоянной температурой t_0 . Результаты оценочных расчетов, в частности, показали, что для наиболее энергонапряженных контейнеров с ОЯТ реакторов РИТМ-200М и СВБР-100 характерны незначительные различия между величиной коэффициента теплоотдачи в области турбулентной свободной конвекции и среднего по высоте контейнера. При этом область ламинарного движения распространяется практически только в пределах днища контейнера, толщина которого в модельном представлении контейнера составляет 0,42 м.

С учетом этих данных в расчетах теплового состояния контейнера в трехмерной постановке в алгоритме программы FFM были использованы критериальные соотношения для турбулентного режима движения, рекомендованные на основе анализа теоретических и экспериментальных исследований [11]. Величина коэффициента теплоотдачи определялась в итерационном цикле по средней по площади боковой поверхности контейнера температуре t_w с учетом зависимости теплофизических свойств воздуха при температуре $T = (t_w + t_0)/2$.

Для сухого хранилища ОЯТ, наряду с общими требованиями ко всем типам хранилищ ОЯТ, предъявляется требование обеспечения безопасного температурного режима хранения топлива. Согласно нормативным требованиям, в условиях нормальной эксплуатации температура оболочек ТВЭЛов не должна превышать 350 °С для топлива реакторов водо-водяного типа и 430 °С для ТВЭЛов реакторов, охлаждаемых свинцово-висмутовой эвтектикой [6, 12]. При этом температура на любой легкодоступной наружной поверхности контейнера не должна превышать 85 °С. Поэтому главной задачей в оценке теплового состояния контейнера ТУК-120 считалось определение максимальных температур в зоне размещения ОТВС и поверхности контейнера ТУК-120 с топливом из реакторов различного типа.

Некоторые результаты математического моделирования теплового режима контейнеров при температуре поступающего воздуха 20 °С приведены на рис. 3 и 4.

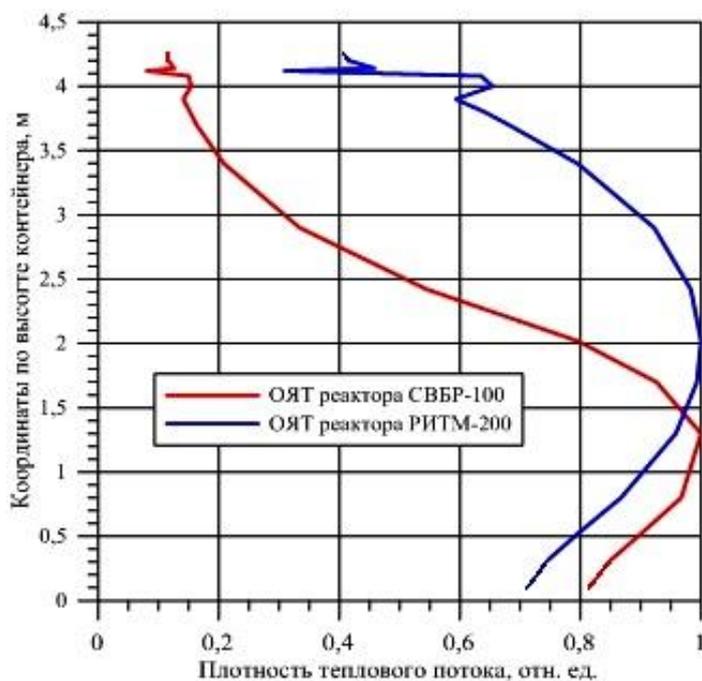


Рис. 3. Относительное распределение плотности теплового потока по высоте боковой поверхности контейнера в наиболее разогретой области (вдоль центральной оси модели)

Fig. 3. Relative distribution of heat flux density over the height of lateral surface of container in the most heated area (along the central axis of the model)

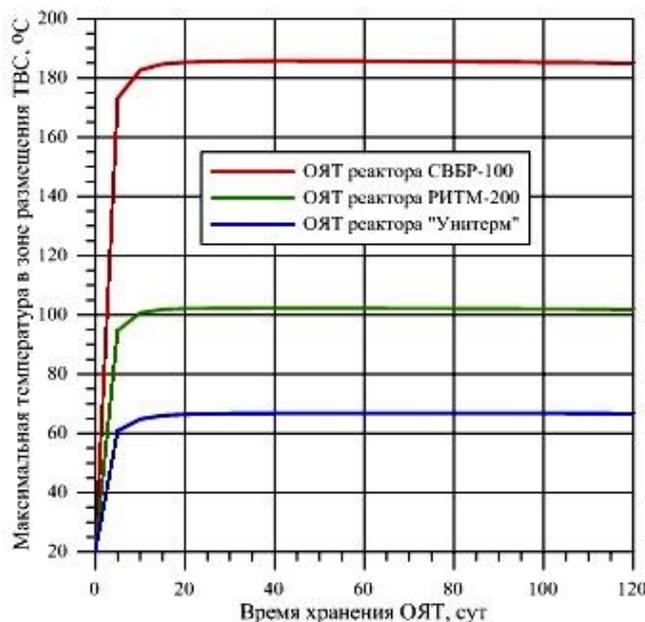


Рис. 4. Динамика изменения максимальной температуры в зоне размещения ОТВС

Fig. 4. Dynamics of change of maximum temperature in the area of fuel placement

Рис. 3 иллюстрирует влияние высоты источника тепла (высота топливной части в чехлах с ОЯТ) на распределение теплового потока на боковой поверхности контейнеров с ОЯТ реакторов РИТМ-200М (высота источника тепла 3,3 м) и СВБР-100 (1,8 м) на время, при котором достигается максимальная температура на боковой поверхности.

Флуктуации теплового потока в верхней части контейнера обусловлены влиянием теплофизических свойств стальных крышек и прокладки между ними. Указанная особенность находит свое отражение и в формировании температурного поля на поверхности контейнера.

На рис. 4 приведены расчетные данные по динамике изменения максимальной температуры в зоне размещения ОТВС из реакторов «УниTERM», РИТМ-200М и СВБР-100.

Данные, приведенные на рис. 4, наглядно иллюстрируют два интервала во времени, отличающихся динамикой температурного режима контейнера ТУК-120. Первый интервал продолжительностью 5–10 суток характеризуется значительным повышением температуры, которое обусловлено разогревом материалов при относительно слабой интенсивности конвективного теплообмена на поверхности контейнера. В последующий период времени прогнозируется значительное снижение скорости разогрева, которое обусловлено повышением интенсивности отвода тепла за счет свободной конвекции в результате постепенного нагрева поверхности контейнера. Динамика температуры на поверхности контейнера в полной мере соответствует указанной особенности температурного режима с некоторым сдвигом во времени (примерно на 5 суток), который связан с процессом разогрева материалов и теплопередачи в конструктивных элементах контейнера.

В обобщенном виде результаты оценки параметров температурного режима контейнеров с ОЯТ приведены в табл. 4, в которой также представлена данные о коэффициенте теплоотдачи на поверхности контейнера, соответствующие его квазистационарному тепловому состоянию.

Из данных, приведенных в табл. 4, видно, что параметры теплового состояния контейнера ТУК-120 с ОЯТ рассматриваемых реакторов малой мощности находятся в пределах нормативных требований по тепловой безопасности при сухом хранении облученного топлива в хранилище контейнерного типа. Можно отметить, что для контейнера с ОЯТ реактора СВБР-100 при времени выдержки топлива 21 год в условиях свободно-конвективного теплообмена прогнозируется практически предельно допустимая температура на его поверхности. Полученные данные показывают, что для сухого хранения ОЯТ реактора СВБР-100 более оптимальным будет использование контейнера ТУК-108/1, который предназначен для одноярусного размещения ОТВС и который, соответственно, будет характеризоваться меньшей энергонапряженностью.

Таблица 4
Table 4

Параметры температурного режима контейнера ТУК-120 на стадии разогрева
The parameters of the temperature regime of the container TUK-120 at the heating stage

Тип реактора Reactor type	Высота источника тепла, м Height of heat source, m	Максимальная температура, °С Maximum temperature, °С		Продолжительность стадии разогрева контейнера, сут Duration of heating stage of the container, days
		в зоне размещения ОТВС in the area of fuel	на боковой поверхности контейнера (коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)) on the surface of container (heat transfer coefficient, W/(m ² ·K))	
«УниTERM» “Uniterm”	2,2	66,8	41,0 (2,97)	100
АБВ ABV	2,6	83,4	47,6 (3,34)	70
РИТМ-200М RITM-200M	3,3	102,3	56,5 (3,76)	65
СВБР-10 SVBR-10	1,8	145,9	69,7 (3,75)	80
СВБР-100 SVBR-100	1,8	185,7	84,5 (4,03)	75

Заключение

Результаты расчетных исследований остаточных тепловыделений ОЯТ реакторов малой мощности позволили установить основные закономерности формирования мощности источников тепла, развивающейся в облученном топливе после останова ядерного реактора. Установлено, что при выдержке ОЯТ, равной или больше продолжительности топливного цикла, характерной для активных зон реакторов АСММ, формирование источников тепла определяется смесью продуктов деления и актиноидов. По мере увеличения времени выдержки ОЯТ повышается вклад α -распада актиноидов в суммарную величину МОЭ. Установленные различия в относительном вкладе актиноидов в суммарную величину остаточного энерговыделения ОЯТ реакторов различного типа обусловлены изотопным составом топлива, который, наряду с энерговыработкой активных зон и временем выдержки топлива, в значительной степени определяется особенностью спектра плотности потока нейтронов, характерного для водо-водяных и жидкометаллических реакторов.

На основе разработанной трехмерной модели одиночного контейнера ТУК-120 с ОЯТ реакторов малой мощности изучены особенности формирования температурного режима контейнера в условиях свободной конвекции на его боковой поверхности. Результаты выполненных исследований позволяют сделать предварительный вывод о том, что интенсивность свободно-конвективного теплообмена может обеспечить отвод остаточных тепловыделений при соблюдении нормативных требований по тепловой безопасности сухого хранения контейнеров с ОЯТ из реакторов АСММ различного типа, рассмотренных в настоящей работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года: утв. Президентом РФ 8 февр. 2013 г. № Пр-232. URL: <http://government.ru/news/432/> (дата обращения: 15.01.2015).
2. Об утверждении заключения государственной экологической экспертизы проекта «Реконструкция здания 5 на ФГУП «Атомфлот» под хранилище контейнерного типа для хранения (до 50 лет) неперерабатываемого отработавшего ядерного топлива атомного ледокольного флота»: приказ от 28 февраля 2005 г. № 118. / Федер. служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: docs.cntd.ru/document/901950066 (дата обращения: 21.02.2019).
3. American National Standard for Decay Heat Power in Light Water Reactors. ANSI/ANS-5.1-1979. La Grand Park / American Nuclear Society. Illinois, 1979. 50 p.
4. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: справочник / В. М. Колбашкин [и др.] М.: Энергоатомиздат, 1983. 382 с.
5. Наумов В. А., Гусак С. А., Наумов А. В. Атомные станции малой мощности для энергоснабжения арктических регионов: оценка радиоактивности отработавшего ядерного топлива // Изв. вузов.

Ядерная энергетика. 2018. № 1. С. 75–86. **6.** Оценка воздействия на окружающую среду при сооружении опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем в Ульяновской области. Кн. 1. URL: http://akmeengineering.com/assets/files/OVOS/OVOS_soo_kn1.pdf (дата обращения: 20.03.2017). **7.** Исследования по обоснованию методологии создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности в условиях Арктики / *Н. Н. Мельников [и др.]* // Арктика: экология и экономика. 2018. № 3 (31). С. 123–136. **8.** Heat removal study for a new type cask storage facility / *H. Takeda [et al.]*. URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/015/3015263.pdf (дата обращения: 24.06.2018). **9.** Гуськов В. А., Долбенков В. Г. Создание, промышленное освоение и введение в эксплуатацию российских двухцелевых транспортно-упаковочных комплексов для транспортирования и хранения отработавшего ядерного топлива // Ядерная и радиационная безопасность России: сб. тр. М., 2009. Вып. 6. С. 109–122. URL: http://www.fcp-radbez.ru/images/stories/FCP/material/sbornik_6.pdf (дата обращения: 21.01.2019). **10.** Научные и инженерные аспекты безопасного хранения и захоронения радиационно опасных материалов на Европейском Севере России / *Н. Н. Мельников [др.]*. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. 305 с. **11.** Попов И. А. Гидродинамика и теплообмен внешних и внутренних свободноконвективных вертикальных течений с интенсификацией. Интенсификация теплообмена / под общ. ред. Ю. Ф. Гортышева. Казань, 2007. 326 с. URL: http://elibrary.ru/download/elibrary_25451497_98141610.pdf (дата обращения: 19.05.2018). **12.** Кудрявцов А. В., Овсянников Е. А. Расчетно-экспериментальное определение температурного состояния элементов транспортного упаковочного контейнера с отработавшим топливом // Атомная энергия. 2006. Т. 100, вып. 6. С. 428–431.

Сведения об авторах

Наумов Вадим Алексеевич — кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: naumovva@goi.kolasc.net.ru

Гусак Сергей Андреевич — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: gusnat52@mail.ru

Author Affiliation

Vadim A. Naumov — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: naumovva@goi.kolasc.net.ru

Sergey A. Gusak — PhD (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher of the Mining Institute of KSC RAS

E-mail: gusnat52@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Наумов, В. А. Изучение закономерностей образования источников тепла в хранилищах контейнерного типа для отработавшего ядерного топлива реакторов малой мощности / *В. А. Наумов, С. А. Гусак* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 2. (11). — С. 105–115.

Reference

Naumov Vadim A., Gusak Sergey A. Study of Formation Regularities of Heat Sources in the Cask Type Storage Facilities for Spent Nuclear Fuel of the Low-Power Reactors. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 2 (11), pp. 105–115. (In Russ.).

VII Всероссийская научная конференция с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения», посвященная 30-летию ИППЭС КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора Вячеслава Васильевича Никонова (1944–2004)

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, 16–22 июня 2019 г.

При финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации, АО «Кольская ГМК» и филиала АО «Концерн Росэнергоатом “Кольская атомная станция”» состоялась VII Всероссийская научная конференция с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения», посвященная 30-летию ИППЭС КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора Вячеслава Васильевича Никонова (1944–2004).

2019 год — юбилейный для ИППЭС КНЦ РАН, который был организован в 1989 г. Тридцать лет назад положено начало научному эксперименту, когда специалисты различных направлений (биологи, химики, географы, математики, технологи и др.) объединились для достижения общей цели — разработки научных основ оптимизации природопользования на Севере на примере Мурманской обл. как наиболее урбанизированного и развитого горно-перерабатывающего региона Арктической зоны РФ (АЗРФ). Все основные направления деятельности института в той или иной форме нашли отражения в тематике конференции, на которой также вспоминали о выдающемся ученом, докторе биологических наук, профессоре В. В. Никонове и его научном наследии — уникальной сети биогеохимического мониторинга в зонах влияния медно-никелевых комбинатов. Эта сеть функционирует более 25 лет и позволяет сформировать корректное представление о современных экосистемных процессах, оценить критические нагрузки на биогеоценозы Севера, предложить критерии их диагностики и методологию мониторинга, обосновать подходы к восстановлению нарушенных территорий.

В числе задач конференции были всестороннее междисциплинарное обсуждение проблем биоразнообразия и функционирования арктических экосистем, выявление адаптивных механизмов и их реакции на воздействие естественных (в т. ч. климатических) и антропогенных факторов, моделирование и прогноз трансформаций экосистем под воздействием данных факторов, оценка социально-экономических процессов в зонах интенсивного природопользования в Арктике, мониторинг воздействия на природную среду в субарктических и арктических регионах и населенных пунктах, с активной промышленной ресурсодобывающей деятельностью.

Конференция собрала рекордное количество заявок: зарегистрировались более 350 исследователей из 140 научно-исследовательских институтов, вузов, отраслевых институтов России и зарубежных стран, а также заповедников и научных станций со всей территории РФ. Общее число участников конференции составило 208 человек, прибывших из Мурманской, Московской, Ленинградской и Ярославской обл., из Петрозаводска, Санкт-Петербурга, Архангельска, Ханты-Мансийска, Сыктывкара, Твери, Москвы, Екатеринбурга, Якутска, Магадана, Ямало-Ненецкого АО и др., а также из ряда зарубежных стран (Финляндии, Норвегии, Франции, Германии, Болгарии, Чили). В конференции участвовали 198 российских ученых, в том числе 34 — сотрудники ИППЭС КНЦ РАН. За пять дней работы конференции было заслушано 144 устных доклада, на стендовой сессии представлено и обсуждено 35 докладов, которые охватили разные сферы научных исследований современных экологических проблем в АЗРФ.

Наиболее важные направления экологических исследований были рассмотрены на пленарном заседании (14 докладов) и 8 секционных сессиях: «Наземные экосистемы под воздействием природных и антропогенных факторов. Актуальные проблемы стационарных исследований» (29 докладов); «Современные тенденции изменения водных экосистем Севера» (17 докладов); «Изменение климата в Арктике: современное состояние и перспективы» (16 докладов); «Изучение и сохранение биоразнообразия таёжных и арктических территорий» (27 докладов); «Рациональное использование и охрана природных ресурсов. Развитие сети ООПТ на Северо-Западе России» (14 докладов); «Геохимия природных сред, технологические аспекты

охраны окружающей среды и новые технологии» (17 докладов); «Человек в условиях Крайнего Севера: социально-экономические и социокультурные аспекты» (4 доклада); «Человек в условиях Крайнего Севера: медицинские и физиологические аспекты» (6 докладов).

Конференция стала площадкой для оживленных дискуссий и плодотворного взаимодействия российских ученых и специалистов друг с другом и своими международными коллегами. Помимо блока секционных и пленарных докладов прошло несколько круглых столов, на которых были обсуждены наиболее острые экологические и социально-экономические проблемы северных регионов. Междисциплинарные исследования в Арктике оказались в центре внимания обсуждения круглого стола по теме «Адаптация природных и социальных систем к изменениям климата в промышленно освоенных районах Российской Арктики» (модераторы: д. т. н. В. А. Маслобоев, к. э. н. Е. М. Ключникова). Круглый стол «Проблемы биологических инвазий в Арктике и Субарктике» (модератор: к. б. н. А. В. Кравченко) собрал флористов, зоологов, экономистов для конструктивного диалога о путях выхода из сложившейся ситуации с заносными и инвазивными видами. Крайне острой проблеме научного и юридического сопровождения природоохранных проектов был посвящен круглый стол «Научная экспертиза природообразующих проектов: между Сциллой и Харибдой» (модераторы к. б. н. Е. А. Боровичев, В. Н. Петров).

В дни проведения конференции в Мурманске состоялся X Международный контактный форум по сохранению местообитаний региона стран Баренцева / Евро-Арктического региона, который смогли посетить 33 участника конференции. В центре внимания тематических секций форума были вопросы охраны местообитаний, проблемы создания и оценки эффективности особо охраняемых природных территорий, охраны водно-болотных угодий и прибрежных местообитаний, сохранения лесов, Зеленый пояс Фенноскандии и перспективы экотуризма. По итогам работы форума принята резолюция, подтверждающая важность охраны местообитаний и необходимость дальнейшей консолидации усилий для сохранения биологического разнообразия, в том числе путем развития сети особо охраняемых природных территорий, сохранения лесов и водно-болотных угодий. Следующий Международный контактный форум состоится в 2021 г. в губернии Норрботтен (Швеция).

В заключительный день конференции для ее участников были организованы полевые экскурсии по экологической тропе Полярно-альпийского ботанического сада-института на гору Вудьяврчорр и в Лапландский государственный природный биосферный заповедник.

Конференция проведена при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации, АО «Кольская ГМК» и филиала АО «Концерн Росэнергоатом “Кольская атомная станция”».

Отчетный научный семинар «Научные результаты морских арктических исследований, проведенных по программе Минобрнауки России в 2018 году»

Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, 17 мая 2019 г.

Основной целью семинара стало обсуждение научных результатов, полученных в ходе морских экспедиций ММБИ КНЦ РАН по программам Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в 2016–2018 гг., и выработка стратегии проведения комплексных экспедиций в рамках тем государственного задания на период до 2022 г. Было заслушано 11 научных сообщений. Большинство докладов было посвящено океанографии и гидробиологии Кольского залива и побережья Баренцева моря, а также экологическим особенностям экосистем в зонах полярных фронтов. Наибольший интерес вызвали доклады, по видовому составу и структуре ихтиофауны в губах и заливах Кольского п-ова. Большое количество вопросов вызвал обобщающий исследования последних лет доклад «Планктон и климат Арктики: инвазия тепловодных видов в XXI веке». Во время доклада о распределении полихет в Западной и Северной частях Баренцева моря возникла дискуссия о возможном влиянии водных масс разного происхождения на видовой состав и количественные характеристики бентосных организмов. По итогам заслушанных докладов было принято решение о подготовке сборника научных статей в формате периодического издания «Труды КНЦ РАН. Океанология», вып. 6.

XXXVII Конференция молодых ученых Мурманского морского биологического института КНЦ РАН «Исследования арктических экосистем», посвященная 120-летию создания Мурманской биологической станции

Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, 16 мая 2019 г.

XXXVII Конференция молодых ученых ММБИ прошла в формате отчетной сессии молодых ученых, в ней приняли участие 62 человека. Ее программа включала 18 устных сообщений. К началу научного мероприятия были изданы материалы конференции.

Конференция открылась вступительным словом директора Института профессора П. Р. Макаревича. В своей напутственной речи он рассказал о роли подобных мероприятий в подготовке молодых специалистов и развитии их навыков и умений. Подчеркнул высокую значимость живого общения и дискуссии в реализации больших научных проектов и тем НИР. П. Р. Макаревич также упомянул, что данное мероприятие посвящено важнейшей страничке в истории Кольского Заполярья — созданию первой на Баренцевом море научно-исследовательской организации Мурманской биологической станции в г. Александровске, идеологическим наследником которой является Мурманский морской биологический институт. Сессия открылась вступительным докладом ведущего ученого ММБИ, главного научного сотрудника лаборатории ихтиологии и физиологии О. В. Карамушко. Докладчик рассказал о предыстории создания и исторических вехах работы станции, подробно остановившись на роли ее руководителей и теме развития технического оснащения, полевых и экспериментальных исследований морских биологов тех лет.

Молодые ученые, студенты и аспиранты представили результаты своих экспериментальных исследований, которые они проводили на полигонах и биостанциях института. Большая часть сообщений базировалась на аналитическом обобщении данных, собранных ими в ходе комплексных морских экспедиций в арктические моря России. Все доклады вызвали большой интерес, самым дискуссионным оказался доклад А. С. Булавиной «Трехмерное положение водных масс Баренцева моря весной 2018 года», где был озвучен новый исследовательский подход к изучению фронтальных зон арктических акваторий. Оригинальные опыты для изучения влияния пленки дизельного топлива на функционирование зеленых водорослей были поставлены Д. О. Салаховым. Результаты эксперимента он озвучил в своем докладе, эмоциональность и яркость которого вызвали живой отклик у аудитории.

Выступающие в дискуссии члены Ученого совета ММБИ с удовлетворением отметили, что все представленные доклады имели достаточно высокий уровень и по качеству базисного материала, и по предложенному анализу данных. Ведущие ученые Института положительно оценили работы З. Ю. Румянцевой и К. К. Москвина, для которых подобная отчетная сессия была первой. Доклады А. Э. Носкович, М. П. Венгер, Д. А. Валуйской включали объемные исследования их кандидатских диссертаций.

XVIII Международная научная конференция студентов и аспирантов «Проблемы Арктического региона»

Полярный геофизический институт, ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, Мурманский арктический государственный университет, Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, 15 мая 2019 г.

В работе конференции приняли участие более 200 чел. из городов Апатиты, Архангельск, Калуга, Кировск, Мурманск, Санкт-Петербург, Бодё, Моргентаун, Лоренс.

На открытии конференции перед участниками пленарного заседания с докладом «Новые подходы в изучении геологии Кольского региона» выступил А. В. Мокрушин, к. г.-м. н., зам. директора по науке Геологического института КНЦ РАН. Затем работа конференции продолжилась на рабочих секциях:

- «Арктическая гидробиология и ихтиология»;
- «Биология и медицина»;
- «Геология и геофизика Арктического региона»;
- «Химико-технологические проблемы»;
- «Гуманитарные и социальные проблемы»;
- «Информационные технологии и математические методы»;

- «Физические проблемы»;
- «Проблемы образования в Арктическом регионе»;
- «Экология и медико-биологические проблемы Севера»;
- «Экономические проблемы освоения Арктики».

На секциях было представлено 136 докладов, посвященных актуальным проблемам Арктического региона и участию молодежи в развитии Севера. На каждой секции были выявлены победители, которым вручили дипломы и подарки.

Перед началом конференции были выпущены тезисы докладов и программа конференции.

По результатам работы конференции будут опубликованы труды, индексируемые в РИНЦ.

XX Торгово-промышленная выставка-ярмарка «Имандра–2019»

ФИЦ КНЦ РАН — участник и соорганизатор, 18–21 апреля 2019 г.

Ключевым событием первого дня работы выставки «Имандра» для Кольского научного центра стало подписание двустороннего соглашения о взаимодействии и сотрудничестве между председателем ФИЦ КНЦ РАН С. В. Кривовичевым и главой Министерства развития промышленности и предпринимательства Мурманской обл. Д. Д. Филипповым. Документ был подписан во время презентации совместного проекта Министерства и ФИЦ КНЦ РАН *«Витрина инновационных изобретений»*. Проект является составной частью сотрудничества между учреждениями и представляет собой виртуальную площадку для демонстрации инновационных изобретений и их продвижения в реальный сектор экономики региона. Уже сейчас начинающие изобретатели и молодые ученые Кольского научного центра: из Института информатики и математического моделирования, Центра наноматериаловедения, Горного института, Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья имели возможность представить свои достижения в рамках данного проекта и были отмечены за свои успехи дипломами за участие в выставке инновационных изобретений.

Проект *«Витрина инновационных изобретений»* нацелен на создание актуальной на сегодняшний день цепочки между создателями инновационных проектов, потенциальными инвесторами, бизнес-партнерами и потребителями конечной продукции. Информационную, организационную и консультативную помощь для подготовки проектов к конечной стадии коммерциализации и их внедрению в производство готовы оказывать специалисты Мурманского регионального инновационного бизнес-инкубатора. Д. Д. Филиппов отметил эффективность такого нового подхода к развитию и реализации инновационных решений, предполагающего взаимодействие государственных органов власти, бизнеса, науки и образовательных сообществ: *«В региональном научном сообществе уже есть огромное количество изобретений, и многочисленные проекты представителей КНЦ РАН тому пример. Однако мало кто знает об этих разработках, и я надеюсь, что задуманный нами проект послужит точкой роста и развития для наших инноваторов»*.

Председатель ФИЦ КНЦ РАН, чл.-корр. РАН С. В. Кривовичев согласился со словами министра о том, что множество изобретений и инновационных технологий остаются малоизвестными и потому невостребованными. Так, в Кольском научном центре получены патенты уже на 1200 изобретений. Еще множество идей и достижений остаются пока не запатентованными, но могут быть зарегистрированы и внедрены в производство, если найдутся инвесторы. Сергей Владимирович выразил надежду, что инициатива Министерства поможет и Федеральному исследовательскому центру, и Мурманской обл. продвинуться в этом отношении, а в результате работы «Витрины инновационных изобретений» найдутся инвесторы не только из крупных промышленных предприятий, но и из среднего и малого предпринимательства. С. В. Кривовичев рассказал, что Кольский научный центр нацелен на то, чтобы как можно более активно участвовать в инновационном развитии региона. Многие разработки ученых КНЦ находятся на стадии реализации или уже внедрены в производство по договору с ОАО «Апатит», АО «Кольская ГМК», АО «СЗФК», ГК «Росатом», ООО «Новатэк» и другими предприятиями. В основном они направлены на решение задач повышения эффективности производства, экологической и техноферной безопасности, разработку новых материалов и технологий.

Инновации и новые технологии обсуждались в этот день за круглым столом на заседаниях «Развитие биотехнологического комплекса региона» и «Развитие горно-химического комплекса и цифровых технологий», где ученые ФИЦ КНЦ РАН встретились для диалога с представителями региональных научно-исследовательских и прикладных институтов: Мурманского морского биологического института, Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии, а также Мурманского государственного технического университета. За 20 лет работы «Имандры» впервые научные мероприятия были представлены так широко.

Все 4 дня работы выставки-ярмарки были открыты выставочные стенды Горного института и Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья ФИЦ КНЦ РАН, где можно было ознакомиться с технологией кускового радиометрического обогащения на примере фотометрической сепарации и образцами строительных материалов на основе природного и техногенного сырья Кольского п-ова.

20 апреля были представлены инновационные проекты Кольского научного центра, направленные на развитие образовательной и культурной среды в г. Апатиты. Начальник научно-инновационного отдела ФИЦ КНЦ РАН В. А. Котельников выступил с презентацией «Программы Фонда содействия инновациям для школьников и студентов» и провел круглый стол «Взаимодействие музеев КНЦ РАН с образовательной и туристской инфраструктурой региона», на который приглашались все желающие. В рамках научно-просветительского лектория под эгидой главы города Апатиты состоялась лекция «Позитивный сценарий развития города Апатиты в условиях меняющегося климата». Спикеры: к. э. н. Е. М. Ключникова (ИППЭС КНЦ РАН); д. т. н., заместитель председателя ФИЦ КНЦ РАН В. А. Маслобоев, к. э. н. Л. А. Рябова (ИЭП КНЦ РАН).

I Всероссийская научная конференция «Медико-биологические проблемы в Арктике»
ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Якутский научный центр комплексных медицинских проблем, Научно-исследовательский центр Медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН, 15–17 апреля 2019 г.

С приветственным словом к участникам конференции обратились: С. В. Кривовичев, чл.-корр. РАН, председатель ФИЦ «КНЦ РАН»; В. В. Мегорский, к. м. н., директор НИЦ МБК КНЦ РАН; О. Г. Минин, к. м. н., директор ФГБУЗ ММЦ им. Н. И. Пирогова ФМБА России. От имени директора Якутского научного центра комплексных медицинских проблем (ЯНЦ КМП) д. м. н. А. Н. Романовой с пленарным докладом выступил руководитель ОИМА ЯНЦ КМП к. б. н. В. М. Николаев. Он поблагодарил организационный комитет конференции за проделанную работу и высказал соображения о сотрудничестве в данном направлении и в будущем.

В мероприятии приняли участие более 100 ученых из Москвы, Санкт-Петербурга, Якутска, Мурманска, Архангельска, Петрозаводска, Магадана, Надыма, Ханты-Мансийска, Биробиджана, Кировска, Апатитов, Грозного, Перьми и Ханты-Мансийска.

Конференция проводилась в формате трехсекционных заседаний:

- 1) проблемы адаптации и дезадаптации человека в экстремальных условиях Арктики;
- 2) состояние окружающей среды и здоровье человека: антропогенный аспект;
- 3) реабилитология, восстановительная с спортивная медицина в Арктической зоне РФ.

Влияние экосоциальных факторов среды на здоровье человека. Северные регионы: привлечение и сохранение человеческого капитала.

Констатировали, что здоровье человека в Арктике — междисциплинарная проблема, имеющая не только медицинский, но и экологический и социальный характер. Изменение традиционного образа жизни (изменение характера питания, низкая физическая активность и др.), негативное влияние экстремальных климатоэкологических и производственных факторов окружающей среды влияют на показатели здоровья населения, что значительно отражается на уровне заболеваемости населения Арктической зоны РФ.

Суровые условия севера вызывают у человека развитие комплекса приспособительных реакций, в которых задействованы практически все системы организма, направленные на поддержание гомеостаза. У людей, прибывающих на Крайний Север из центральных районов России и других стран, умеренных широт, отмечается различные нарушения адаптивных механизмов, характеризующиеся снижением приспособительных возможностей организма

и развитием патологических состояний. Немаловажным фактором возникновения дезадаптации на севере является особый световой режим на Крайнем Севере, который приводит к нарушениям сна и его недостаточной продолжительности, что, в свою очередь, может являться причиной повышенного риска кардиометаболических и психиатрических заболеваний, а также снижения работоспособности.

В то же время требуют обсуждения низкие показатели смертности населения от всех причин смерти, включая болезни системы кровообращения, по сравнению с очень высокими показателями заболеваемости болезнями системы кровообращения и органов дыхания (что характерно, например, для Чукотки). В связи с тем, что в формировании показателей смертности и заболеваемости в северных (и особенно дальневосточных) регионах РФ принимает участие более здоровое, чем в остальной части страны, население, климатически обусловленными являются показатели демографической структуры, а не здоровье населения. В регионах с суровым климатом снижена доля лиц с ослабленным здоровьем, в первую очередь, из старшей возрастной когорты, что связано с их миграцией в более благоприятные территории при возникновении угроз, вызванных природно-климатической дискомфортом.

В связи с этим остается актуальной проблема изучения влияния арктических условий на организм человека с учетом медико-демографических, экологических, генетических, иммунологических, морфофункциональных и других исследований, включая модели с экспериментальными животными, а также разработка новых форм и методов коррекции и лечения с учетом региональных специфик севера.

Для поддержания медико-демографического баланса в Арктической зоне необходимо проведение государственной политики, направленной на выявление угроз, закрепления населения и укрепление здоровья человека.

XVI Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская научная сессия

Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, 7–10 апреля 2019 г.

Сессия началась празднованием Дня геолога в доме ученых «Тигетта» на берегу оз. Имандра, где участники и гости могли пообщаться в неформальной обстановке. Главным блюдом праздника является шурпа и шашлык из оленины. В программе была предусмотрена развлекательная программа для детей и взрослых.

Официальная программа сессии началась 8 апреля с торжественной церемонии открытия мемориальной доски, посвященной памяти акад. РАН Ф. П. Митрофанова, который в 1986–2007 гг. занимал пост директора Геологического института КНЦ РАН. На церемонии открытия мемориальной доски с торжественной речью выступили академик — секретарь Отделения наук о Земле РАН А. О. Глико, председатель ФИЦ КНЦ РАН член-корр. РАН, д. г.-м. н. С. В. Кривовичев, глава г. Апатиты А. Г. Гиляров, директор ГИ КНЦ РАН д. г.-м. н. Н. Е. Козлов, начальник отдела инноваций ГИ КНЦ РАН Д. В. Жиров.

Продолжилась XVI Ферсмановская научная сессия серией пленарных докладов. Член-корр. РАН, д. г.-м. н., главный научный сотрудник ИГЕМ РАН К. В. Лобанов сделал доклад об особенностях месторождений стратегических металлов Арктического региона. Ведущий научный сотрудник ГИ КНЦ РАН, к. г.-м. н. Д. Р. Зозуля рассказал о фундаментальных проблемах и перспективах изучения месторождений полезных ископаемых Кольского региона и осветил работу возглавляемой им лаборатории минералогии Арктики. Главный научный сотрудник ГИ КНЦ РАН, д. г.-м. н. Т. Б. Баянова представила основные достижения Кольского центра коллективного пользования геохронологических и геохимических исследований. Зав. научным архивом ФИЦ КНЦ РАН, к. и. н. Е. И. Макарова познакомила участников конференции с архивными материалами по истории Кольского филиала АН СССР в 1949–1988 гг.

С 8 по 10 апреля научная программа ФНС включала трехдневную работу четырех секций, часть которых была проведена совместно с ЦНМ, ИХТРЭМС и ИППЭС КНЦ РАН:

- «Региональная геология, геофизика и полезные ископаемые»;
- «Общая и генетическая минералогия»;
- «Технологическая минералогия»;
- «Геоэкология».

Всего на сессии было представлено 8 пленарных, 61 устный и 25 стендовых докладов.

География участников Ферсмановской научной сессии в 2019 г. оказалась чрезвычайно широка. Очно и заочно в работе конференции приняли участие более 250 исследователей из Апатитов, Кировска, Мурманска, Петрозаводска, Санкт-Петербурга, Москвы, Черноголовки, Ростова-на-Дону, Иркутска, Южно-Сахалинска, Владивостока, Хабаровска, Новосибирска, Екатеринбурга, Читы, Мирного, Якутска, Сыктывкара, а также иностранные коллеги из Белоруссии, Польши и Индии. На сессии были представлены вузы Северо-Западного и Центрального регионов: Московский государственный университет, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербургский государственный университет, Мурманский государственный технический университет, Мурманский арктический государственный университет, Петрозаводский государственный университет и др.

Глобальные тенденции освоения энергетических ресурсов Российской Арктики: в 2 ч. Ч. I: **Тенденции экономического развития Российской Арктики** / под науч. ред. д. э. н. С. А. Агаркова, чл.-корр. РАН В. И. Богоявленского, д. э. н. С. Ю. Козьменко, д. т. н. В. А. Маслобоева, к. э. н. М. В. Ульченко. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 170 с.: ил.

Исследуется взаимодействие глобальных тенденций в процессах регионального развития «новой Арктики» в эпоху глобального потепления. С этих позиций представлена ретроспектива геополитических и экономических тенденций развития арктических коммуникаций и выделены особенности российско-китайского регионального взаимодействия в этом процессе. Выполнена оценка формирования российской группировки кораблей и судов ледового класса для обеспечения военного и экономического присутствия России в Арктике.

Показана организация транспортного обеспечения крупных энергетических проектов в аспекте морской транспортировки нефти, угля и природного газа, выявлены направления развития отечественного судостроения для модернизации арктических коммуникаций. При этом значительное внимание уделено исследованию тенденций потребления энергетических ресурсов особенно в странах ЕС. На этом фоне выполнена оценка конкурентоспособности и экономической конъюнктуры российского природного газа на европейском энергетическом рынке, представлена перспектива воспроизводства запасов природного газа в Российской Арктике.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2019-0028 «Взаимодействие глобальных, национальных и региональных факторов в экономическом развитии Севера и Арктической зоны Российской Федерации» по государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ

Монография может быть интересна и полезна широкому кругу научных и педагогических работников — исследователей в области пространственной экономики, экономики, организации и управления народным хозяйством в сфере освоения энергетических ресурсов и представляет собой весомый вклад в дальнейшее развитие арктических исследований. Книга может быть рекомендована также в качестве учебного пособия студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

Глобальные тенденции освоения энергетических ресурсов Российской Арктики: в 2 ч. Ч. II: **Мониторинг освоения арктических энергетических ресурсов** / под науч. ред. д. э. н. С. А. Агаркова, чл.-корр. РАН В. И. Богоявленского, д. э. н. С. Ю. Козьменко, д. т. н. В. А. Маслобоева, к. э. н. М. В. Ульченко. — ФИЦ Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2019. — 177 с.: ил.

Детально исследована пространственная организация регионального хозяйства при освоении энергетических ресурсов с позиций обоснования системы программного управления развитием арктического пространства и определения приоритетов освоения энергетических ресурсов Арктики, а также определены особенности энергообеспечения Арктической зоны РФ и специфика формирования этой системы в период реализации санкционной политики.

В исследовании представлена широкая панорама глобальных трендов освоения ресурсов углеводородов Арктики с обоснованием стратегии развития нефтегазовой индустрии России. Это является центральным фрагментом монографии наряду с фундаментальной оценкой экологического состояния арктического пространства при освоении энергетических ресурсов. Показаны колебания экологического состояния среды обитания п-ова Ямал и Печорского моря в условиях развития газо- и нефтедобычи в целях формирования системы рационального природопользования в Арктике и проведения экологического мониторинга регионального морского пространства.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 13.11485.2017/БЧ «Совершенствование методов оперативной и долгосрочной диагностики среды обитания морских гидробионтов в условиях активного промышленного освоения углеводородов арктического шельфа» по государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ.

Монография может быть интересна и полезна широкому кругу научных и педагогических работников — исследователей в области пространственной экономики, экономики, организации и управления народным хозяйством в сфере освоения энергетических ресурсов и представляет собой весомый вклад в дальнейшее развитие арктических исследований. Книга может быть рекомендована также в качестве учебного пособия студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

ИППЭС КНЦ РАН: 30 лет — полет нормальный: сборник материалов к юбилею института / коллектив авторов; отв. ред.: Е. А. Боровичёв, О. И. Вандыш; ред.: Е. А. Боровичёв, О. И. Вандыш. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 208 с.: ил.

Представлены материалы, посвященные истории создания, современному состоянию и перспективам научных исследований Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН. Публикация посвящена тридцатилетию института.

Издание представляет интерес для научных работников, а также студентов естественно-научных и гуманитарных специальностей.

Медико-биологические проблемы в Арктике: сб. тез. I Всерос. науч.-практ. конф. (Апатиты, 15–17 апреля 2019 г.). — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 75 с.

Представлены результаты исследований по широкому спектру научно-исследовательских и работ в области клинической и профилактической медицины, гигиены труда и окружающей среды, оценки здоровья человека при воздействии различных факторов в экстремальных условиях Арктики. Материалы публикуются в авторской редакции.

Конухин, В. П. Русские и немцы. Преодоление предрассудков. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 178 с.

Очерки профессора, доктора технических наук, академика Российской академии естественных наук посвящены многолетнему сотрудничеству российских и германских инженеров и ученых в области радиационной и ядерной безопасности и в Западном секторе Российской Арктики и на Севере Европы.

Несомненный интерес читателей могут вызвать и мастерски написанные портреты участников этого сотрудничества и картины реальной жизни в современной Германии.

Сценарии развития Мурманской области в условиях глобальных неопределенностей и изменений климата / коллектив авторов; под науч. ред. д. т. н. В. А. Маслобоева, к. э. н. Л. А. Рябовой, к. э. н. Е. М. Ключниковой. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 52 с.

Отчет содержит результаты проведения междисциплинарного исследовательского семинара «Сценарии развития Мурманской области в условиях глобальных неопределенностей и изменений климата», организованного в рамках выполнения проекта № 18-05-60142 «Зоны интенсивного природопользования в российской Арктике в условиях изменения климата: природные и социальные процессы в долгосрочной перспективе», грант РФФИ-Арктика.

Описана методика проведения исследовательского семинара на основе применения сценарного подхода, представлены тексты тематических докладов, сделанных участниками проекта, и четыре возможных сценария развития Мурманской обл. на период до 2050 г., разработанные на семинаре. Отчет может быть полезен для научных работников, аспирантов и студентов различных специальностей, а также тех, кого интересуют проблемы изменения климата в Арктике, в частности, его возможные экономические, социальные и экологические последствия для одного из арктических регионов России — Мурманской области.

Авторский коллектив: Д. Б. Денисов (раздел 2.2.2), Л. В. Иванова (разделы 1, 3.4), Л. Г. Исаева (раздел 2.1.1), Е. М. Ключникова (разделы 2.2, 3, 3.2), Д. В. Макаров (раздел 2.2.3), В. А. Маслобоев (введение, 3.1, заключение), Л. А. Рябова (разделы 2.2.4, 3, 3.3, заключение).

Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: тез. докл. VII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В. В. Никонова (Апатиты, 16–22 июня 2019 г.) / ред.: *Е. А. Боровичёв, О. И. Вандыш.* — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 468 с.

Целью проведения VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В. В. Никонова является обсуждение и поиск решений основных проблем функционирования арктических экосистем, их возможных трансформаций вследствие естественных и антропогенных воздействий. В сборнике представлены 227 тезисов докладов, посвященных обсуждению проблем биоразнообразия северных экосистем, выявлению адаптивных механизмов и реакции экосистем на воздействие естественных и антропогенных факторов, моделированию и прогнозу трансформаций экосистем под воздействием этих факторов, оценке социально-экономических процессов в зонах интенсивного природопользования в Арктике, мониторингу воздействия на природную среду в арктических регионах и населенных пунктах с активной промышленной ресурсодобывающей деятельностью.

Издание представляет интерес для научных работников разных специальностей, преподавателей вузов, учителей средней школы, а также студентов естественнонаучных и гуманитарных специальностей.

Север и рынок: формирование экономического порядка: науч-информ. журн. / Ин-т экон. проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — № 1 (63). — 167 с.



КУНШИНА Галина Борисовна



к. т. н., старший научный сотрудник лаборатории № 25 Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева.

После окончания в 1981 г. с отличием химического факультета Ленинградского государственного университета начала трудовую деятельность в Институте химии в должности стажера-исследователя, затем работала старшим лаборантом, младшим научным сотрудником, научным сотрудником, с 2003 г. —

старшим научным сотрудником.

На основе проведенных исследований по синтезу и изучению свойств медьпроводящих твердых электролитов Галиной Борисовной в соавторстве была разработана и в 1987 г. испытана на Ловозерском ГОКе технология получения твердого электролита состава $\text{Cu}_4\text{RbCl}_3\text{I}_2$. В 1988 г. без отрыва от производства она окончила аспирантуру Кольского научного центра РАН и в 1991 г. защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Химия и технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов».

В последующие годы Г. Б. Куншина проявила себя высококвалифицированным специалистом. Она проводила исследования по синтезу и изучению электрохимических свойств литийпроводящих твердых электролитов, разработке технологий извлечения благородных металлов из вторичного сырья, получения вольфрамата свинца особой чистоты, цирконата стронция и титаната бария в виде наноразмерных порошков, разработке методов получения эпитаксиальных покрытий танталата лития и оксида цинка на изоструктурных подложках. Данные исследования были поддержаны программами Президиума РАН, Отделения химии и технологии неорганических материалов РАН, грантами Правительства Москвы, грантом «Ведущие научные школы». За эти исследования Галина Борисовна была награждена тремя дипломами Президиума КНЦ РАН, золотой медалью и дипломом первой степени XII Международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции», золотой медалью и дипломом первой степени V Межрегиональной научно-промышленной выставки «Инновации, производство, рынок», Почетной грамотой РАН.

В настоящее время область научных интересов — направленный синтез неорганических веществ с заданными свойствами на основе сложных оксидов. Г. Б. Куншина — ответственный исполнитель по программе фундаментальных исследований Президиума РАН «Арктика — научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития», проект «Наноструктурированные композиционные электродные материалы для литий-ионных аккумуляторов с повышенными характеристиками для эксплуатации в условиях Арктики». В рамках этих исследований под ее руководством разработан ряд составов перспективных неорганических твердых электролитов с высокой литий-ионной проводимостью, защищенных патентами РФ.

Результаты научной деятельности отражены в 190 публикациях, в том числе 1 монографии, 63 статьях в рецензируемых журналах, в 16 авторских свидетельствах и патентах РФ.

Галина Борисовна Куншина пользуется глубоким уважением сотрудников Института за принципиальность, настойчивость в достижении поставленной цели и благожелательность.

Поздравляем Галину Борисовну с юбилеем и желаем здоровья, неугасимой энергии, дальнейших творческих успехов!



МАСЛОБОВЕВ Владимир Алексеевич

д. т. н., заместитель председателя ФИЦ КНЦ РАН по научной работе, научный руководитель Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН.

В Кольском научном центре РАН — с 1972 г., куда пришел работать после окончания с отличием Московского института тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова. За этот период он проявил себя как научный лидер в области технологии комплексного редкометалльного сырья Кольского п-ова и технологических аспектов охраны окружающей среды. Автор более

500 научных работ, в том числе свыше 35 изобретений и 5 монографий.

В. А. Масlobоев развил важное научное направление по разработке технологических схем комплексной переработки нетрадиционного редкоземельного сырья Мурманской обл. (лопарит, эвдиалит, перовскит, иттробитолит и иттрофлюорит, апатиты различных генераций). Им обоснованы и разработаны новые комбинированные гидрометаллургические методы, основанные на совмещении операций разложения минералов, выщелачивания, конверсии и жидкостной экстракции в одном процессе. Результаты этих работ являются научной основой при создании в Мурманской обл. Кольского химико-технологического кластера по производству стратегических материалов на основе редких и редкоземельных металлов.

Владимир Алексеевич — координатор международного научно-технического сотрудничества ФИЦ «Кольский научный центр РАН» со Скандинавскими странами. Под его руководством выполнены и выполняются крупные международные проекты по программе «Коларктик» в интересах Мурманской обл., что позволило привлечь в научную сферу региона за последние 10 лет более одного 1 млн евро.

Работая в 1995–1999 гг. первым секретарем Посольства РФ в Норвегии, В. А. Масlobоев способствовал успешному развитию научно-технического и экономического сотрудничества со Скандинавскими странами, особенно в решении экологических проблем Баренцева Евро-Арктического региона, повышению ядерной и радиационной безопасности, привлекая иностранную финансовую помощь для санации губы Андреева, утилизации судна «Лепсе» и др.

Возглавив в 2001 г. Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, В. А. Масlobоев принимал активное участие в решении конкретных задач предотвращения экологического ущерба в региональном природопользовании и восстановления нарушенных экосистем. Под его руководством выполнен ряд крупных проектов по оценке воздействия на окружающую среду ряда планируемых и реконструируемых промышленных объектов, имеющих первостепенное значение для развития промышленного потенциала региона (освоение месторождения Олений ручей СЗФК, расширение мощностей Ковдорского ГОКа, повышение экологической безопасности хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит», солевых стоков Кольской ГМК и др.).

На протяжении 15 лет — с 2001 по 2016 гг., когда он возглавлял Институт проблем промышленной экологии Севера, были выведены на новый качественный уровень работы по изучению биоразнообразия, что позволило создать пять новых особо охраняемых природных территорий, включая национальный парк «Хибины». По его инициативе в Институте получили развитие междисциплинарные исследования на стыке наук о Земле и биологических наук: теоретическое и экспериментальное обоснование методов восстановления техногенно нарушенных лесных экосистем в зоне влияния предприятий Кольской ГМК и биорекультивации отвалов промышленных отходов; биотехнологии извлечения металлов; очистка и ремедиация природных и техногенных сред от нефтяных и других загрязнителей.

В. А. Маслобоев — профессор Мурманского арктического государственного университета, где читает курсы лекций по материаловедению и материалам электронной техники, теории тепловых свойств веществ, и профессор Мурманского государственного технического университета, где читает курсы лекций по гидрометаллургическим процессам, устойчивому развитию, современной минерально-сырьевой базе. Создал и руководит магистерской программой по прикладной геоэкологии. Под его руководством защищено 4 кандидатских диссертации и подготовлено более 20 магистров по прикладной геоэкологии для отраслей экономики Мурманской обл.

Владимир Алексеевич активно участвует в жизни Мурманской обл.: он входит в состав Экономического совета при губернаторе Мурманской обл., Совета по улучшению инвестиционного климата Мурманской обл., член Правления Северной торгово-промышленной палаты.

В. А. Маслобоев представляет Мурманскую обл. в президиуме Экспертного совета по вопросам законодательного обеспечения развития районов Крайнего Севера, приравненных к ним местностей, районов Дальнего Востока, а также территорий, входящих в Арктическую зону, Государственной Думы РФ, в рабочей группе «Развитие образования и науки» Государственной комиссии по вопросам развития Арктики, в научном совете Российского научного центра на арх. Шпицберген.

За высокие достижения в развитии научного и кадрового потенциала региона В. А. Маслобоев в 1986 г. был награжден медалью «За трудовую доблесть», в 2010 г. — орденом Дружбы.

Коллектив Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН поздравляет Владимира Алексеевича с замечательной юбилейной датой и от всей души желает ему крепкого здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов на ниве российской науки.

ИВАНЮК Григорий Юрьевич
23 февраля 1966 г. — 7 июля 2019 г.



Кольский научный центр постигла тяжелая, невосполнимая утрата.

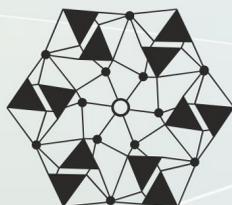
7 июля 2019 г. скоропостижно скончался доктор геолого-минералогических наук, профессор Григорий Юрьевич Иванюк, заместитель председателя ФИЦ КНЦ РАН по научно-инновационной деятельности, заведующий лабораторией комплексного анализа уникальных рудоносных систем Геологического института КНЦ РАН.

Григорий Юрьевич Иванюк окончил геологический факультет Ленинградского государственного университета в 1988 г. В Геологический институт на работу он пришел в 1988 г. на должность старшего лаборанта, в том же году поступил в очную аспирантуру при ГИ КНЦ РАН (научный руководитель д. г.-м. н. П. М. Горяинов), успешно окончил аспирантуру в 1991 г., а в 1992 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Магнетит железистых кварцитов Кольского полуострова». Г. Ю. Иванюк — автор пионерных работ по самоорганизации минеральных систем, фрактальным геологическим средам, рудообразованию в метаморфических комплексах, щелочных и щелочно-ультраосновных массивах, их петрологии и минералогии. В 2004 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Минералогия и петрология месторождений полосчатой железорудной формации Кольского полуострова». В последние годы он активно изучал закономерности образования нанопористых титаносиликатов в щелочных комплексах, совмещая работу в ГИ КНЦ РАН и Отделе исследований природных и синтетических нано- и микропористых веществ (Центр наноматериаловедения — ЦНМ) КНЦ РАН, проводил исследования для технолого-экономической оценки извлечения редкоземельных элементов на первоочередных объектах Кольского региона.

Григорий Юрьевич — автор 7 книг и более 150 научных статей в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Он участвовал в открытии более 10 новых минеральных видов. За вклад в минералогию и петрологию метаморфических комплексов, щелочных и щелочно-ультраосновных массивов Международной минералогической ассоциацией в 2007 г. утверждены названия четырех новых минералов группы иванюкита. В феврале 2016 г. за многолетнюю плодотворную деятельность, большой вклад в укрепление научного и образовательного потенциала Мурманской обл. Г. Ю. Иванюк был поощрен Благодарностью губернатора Мурманской обл. В 2017 г. Григорий Юрьевич приступил к работе в должности заместителя председателя ФИЦ КНЦ РАН по научно-инновационной деятельности, где вложил свой талант и энергию в развитие структуры ФИЦ КНЦ РАН, осуществление инновационных преобразований и продвижение новых научных направлений.

Замечательный ученый с колоссальной работоспособностью, верный друг и настоящий семьянин, светлый и глубоко искренний человек — таким он навсегда останется в нашей памяти и в наших сердцах.

Сотрудники ФИЦ КНЦ РАН выражают искреннее соболезнование его родным и близким. Мы запоем Григория Юрьевича как выдающегося минералога, яркого, энергичного руководителя, талантливое, широко одаренное человека. Руководство и сотрудники Кольского научного центра приносят свои глубочайшие соболезнования семье, друзьям и коллегам почившего. Вечная память!



КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

184209, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Ферсмана, 14

KOLA SCIENCE CENTRE

14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, RUSSIA

РИО

КНЦ
naukaprint.ru

